

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LIBEREC 2010

LADISLAV BALÁŽ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

Studijní program: B3107 Textil
Studijní obor: Netkané textilie

**VLIV STRUKTURY NA VLASTNOSTI
NANOVLÁKENNÝCH VRSTEV**
**EFFECT OF STRUCTURE ON PROPERTIES
NANOFIBER LAYERS**

Ladislav Baláž

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D

Konzultant:

Ing. Jitka Färberová

Rozsah práce:

Počet stran textu.....53

Počet obrázků23

Počet tabulek.....11

Počet grafů5

Počet stran příloh....2

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená *bakalářská* práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *bakalářské* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou *bakalářskou* práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Berou na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé *bakalářské* práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé *bakalářské* práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své *bakalářské* práce mi poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat plnění poplatků na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 14. května 2010

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce, Ing. Jiřímu Chaloupkovi, Ph.D. za rady a trpělivost, kterou mi v průběhu vytvoření této práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Jitce Färberové za věcné rady a podporu na této práci.

Anotace

Tato práce se zabývá studiem vlivu struktury na vlastnosti nanovláknenných vrstev. Teoretická část je zaměřena na popis materiálových vlivů, procesních a systémových parametrů, charakterizaci polymerních nanovláken a jejich aplikace.

Experimentální část této práce zahrnuje zkoumání různých nastavených kolektorů a kolektoru resp. koncentrací polymerních roztoků polyvinylalkoholu a jejich vliv na vlastnosti nanovláknenných vrstev.

Klíčová slova: elektrostatické zvláknění, nanovláknena, úhel sklonu kolektoru

Anotace

This work investigates the effect of structure on properties of nanofiber layers. The theoretical part is aimed at describing the effects of material, procedural and system parameters, the characterization of polymer nanofibers and their applications.

The experimental part of this work includes exploring different set of collectors or collector respectively concentration of polymer solution of polyvinyl alcohol and their effects on the properties of nanofiber layers.

Keywords: electrospinning, nanofibres, slope angle of collector

OBSAH

1. Úvod	9
2. Teoretická část	10
2.1 Elektrostatické zvlákňování	10
2.1.1 Historie elektrostatického zvlákňování	10
2.1.2 Podstata procesu elektrostatického zvlákňování	11
2.1.3 Modifikace zařízení pro elektrostatické zvlákňování.....	12
2.1.4 Vliv parametrů na elektrostatické zvlákňování	14
2.2 Nanovláknna	17
2.2.1 Vlastnosti.....	17
2.2.2 Aplikace nanovláken	18
2.3 Polymery používané pro elektrostatické zvlákňování	21
2.4 Polyvinylalkohol (PVA)	23
2.4.1 Výroba PVA	23
2.4.2 Struktura PVA	24
2.4.3 Vlastnosti PVA	24
2.4.4 Použití PVA	26
2.5 Elektronová a světelná mikroskopie	26
2.6 Obrazový analyzátor NIS ELEMENTS 3.0	28
3. Experimentální část	29
3.1 Příprava a složení roztoku PVA	29
3.2 Zařízení pro elektrostatické zvlákňování	30
3.3 Vyhodnocení nanovláknenných struktur	34
3.3.1 Poróznost	34
3.3.2 Průměry nanovláken	40
3.3.3. Distribuce nanovláken	44
3.4 Zhodnocení snímků nanovláknenných vrstev z makrohlediska.....	51
4. Závěr	53
Seznam použité literatury.....	54
Seznam příloh.....	55

Seznam použitých symbolů a zkratk

PVA	- polyvinylalkohol
PAD	- polyamid
PE	- polyethylen
μm	- mikrometr
nm	- nanometr
g/mol	- molární hmotnost
AFM	- mikroskopie atomových sil
SEM	- skenovací elektronový mikroskop
TEM	- transmisní elektronový mikroskop
g/m^2	- plošná hmotnost
%	- procento
	- alfa
	- beta
	- gamma
	- psí
	- zéta
	- í
mol %	- molární procenta
MN.m^{-2}	- pevnost v tahu
PPS	- průměrný polymerní stupeň
T_g	- teplota skelného přechodu
T_t	- teplota tání
P	- poróznost
Sp	- celková plocha vláken
Sc	- celková plocha snímku
$^{\circ}\text{C}$	- stupeň Celsia
$[^{\circ}]$	- stupeň
Obr.	- obrázek
Tab.	- tabulka
tzn.	- to znamená
tzv.	- takzvaný

1. Úvod

Nanotechnologie patří mezi moderní v dnešní disciplíny, kde je výzkum soustředěn na vývoj nových materiálů a struktur, které se pohybují v měřítku několika nanometrů, alespoň v jednom rozměru. Součástí tohoto progresivního oboru je elektrostatické zvláknění vyznačující se velkým zájmem vdeckých a výzkumných pracovníků. Využití nanomateriálů je velice rozsáhlé a uplatňovány mohou být v mnoha oborech lidské společnosti, zejména ve zdravotnictví pro cílené dávkování léků, resp. náhrady tkání. Dalším oborem, kde se mohou uplatnit nanomateriály, je elektronika, například v paměťových médiích atd.

Tato bakalářská práce se zabývá strukturou a vlastnostmi nanovláknenných vrstev vyrobené elektrostatickým zvlákněním roztoku polyvinylalkoholu, a to s použitím různých uspořádaných kolektorů i kolektoru. Cílem této práce bylo otestovat navržené zařízení s případnými sklony kolektoru/ů v závislosti na různých koncentracích polymerních roztoků PVA. Další část této práce se soustředila na vyhodnocení nanovláknenných vrstev získaných z různých sklonů kolektorů, resp. kolektoru a různých koncentrací polymerních roztoků. Výsledné nanovláknenné vrstvy se vyhodnocovaly prostřednictvím obrazové analýzy NIS-elements 3.0, elektronové a světelné optické mikroskopie. Proměřeny byly především průměry, poróznost a distribuce nanovláken ve vrstvách.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Elektrostatické zvlákňování

Elektrostatické zvlákňování umožňuje vyrobit vlákna, jejichž průměr se pohybuje v řádech 100 nanometrů. Někdy se označují jako vlákna submikronová, pohybují se tedy v oblastech pod $1\mu = 1000$ nanometrů (nm). Je to způsob přípravy extrémně jemných vláken z polymerního roztoku nebo taveniny za pomoci elektrostatických sil. Upesňovány jsou spíše polymerní roztoky než polymerní taveniny, jejichž vyšší viskozita znesnadňuje výrobu jemných vláken. Dnes lze použít více než 50 syntetických a přírodních polymerů. Je možno říci, že to jsou materiály tisíciletí. Díky svým unikátním vlastnostem jsou vhodné v mnoha směrech, jako je medicína, elektronika, automobilový průmysl, filtrace atd. [1].

2.1.1. Historie elektrostatického zvlákňování

První zmínky o výrobě nanovláken vychází z let 1934 až 1944. Anton Formhals publikoval několik patentů obsahujících zařízení pro výrobu polymerních vláken za užití elektrostatických sil. Pro svůj experiment použil polymerní roztok acetátu celulózy, který zvláknil v jemné filamenty.

V roce 1952 Vonnegut a Neubauer zkonstruovali přístroj vytvářející jednotlivé elektrizované kapky o průměru 0,1mm, a to procesem zvaným elektrostatické rozprašování (electrospraying).

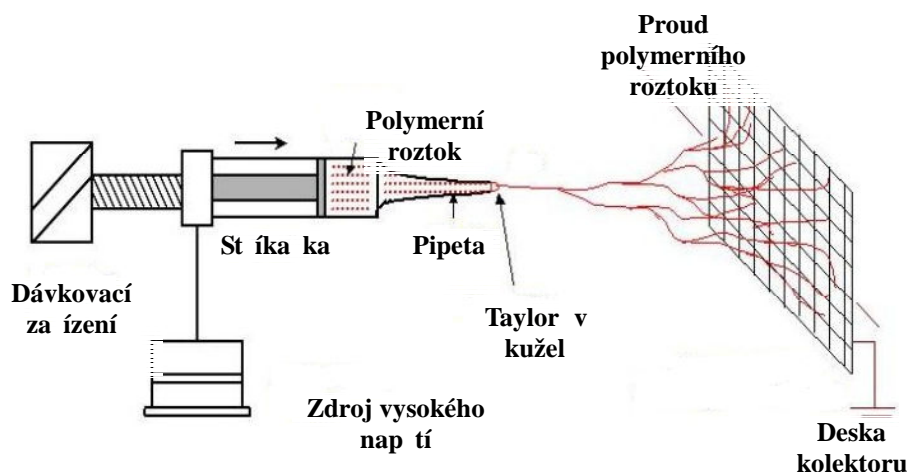
Dalším pokračovatelem byl v roce 1966 Simons, který vyvinul zařízení na výrobu velmi jemných a lehkých netkaných textilií. Půšel na to, že z polymerních roztoků nízké koncentrace se utvářejí kratší a jemnější vlákna, zatímco u viskóznějších roztoků byla vlákna poměrně relativně spojitá.

Baumgarten v roce 1971 zhotovil přístroj k výrobě akrylových vláken s průměry v rozmezí 0,05 až 1,1 mikron [1].

V roce 2003 vyvinul tým profesora Jirsáka na katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci technologii na výrobu nanovláken nazývaný Nanospider. Je to technologie umožňující vyrábět nanovlákna v průmyslovém měřítku.

2.1.2 Podstata procesu elektrostatického zvlák o vání

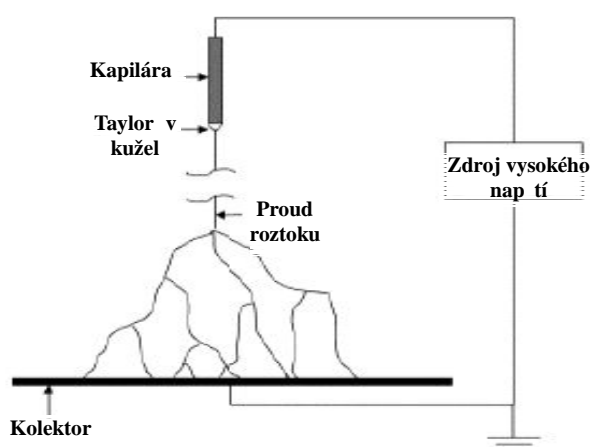
Proces elektrostatického zvlák o vání je založen na využití vysokého nap tí k vytvo ení elektricky nabitého proudu polymerního roztoku i taveniny. Elektroda vysokého nap tí je spojena s polymerním roztokem i taveninou. Polymerní roztok je protla ován kapilárou (zvlák ovací tryskou) a dále zvlák ován. Vysoké nap tí mezi špi kou kapiláry a uzemn ým kolektorem (sb ra em) zp sobuje vznik na špi ce kapiláry kónický tvar nazývaný Taylorl v kužel, ze kterého jsou produkována nanovlákna. P í inou Taylorova kužele je uvoln ní indukovaného náboje k volnému povrchu kapaliny na výstupu trysky až do doby, kdy je p ekonáno povrchové nap tí kapaliny. Následuje extruze nabité kapaliny. Vlivem odpa ení rozpoušt dla vlákna ztuhnou a uloží se na povrchu kolektoru, kde vytvo í vlákennou vrstvu. Nabitý proud se zrychluje a zjem uje do té doby, než narazí na protielektrodu uzemn ného kolektoru, kde se usadí. Existuje n kolik podmínek, za kterých je kapalinový proud nestabilní p ed tím, než narazí na kolektor. Nap . pokud jde o roztok nižší molekulové hmotnosti, vytvá í spršku malých nabitých kapi ek. Tento jev se nazývá elektrostatické rozprašování. [2].



Obr. 1 Schéma principu elektrostatického zvlák o vání – horizontální kapilára [1]

2.1.3 Modifikace zařízení pro elektrostatické zvlákňování

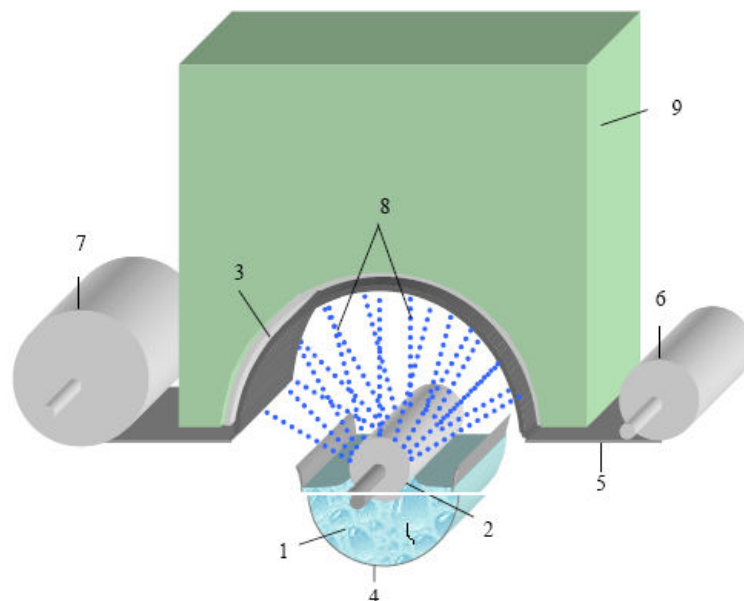
Zařízení pro elektrostatické zvlákňování existuje v mnoha variantách. Může jít o změny nastavení a provedení jednotlivých komponent výrobního zařízení. Například kapilára umístěná svisle a pod ní uložená sbírací deska (Obr. 2). Další možné nastavení kapiláry může být v horizontální poloze (Obr. 1). V obou případech je možno dávkovat polymerní kapalinu do elektrostatického pole dávkovacím zařízením. V jiném provedení bývají i sbírací desky (kolektory) jako rotující váleček, disk ze zúženým okrajem nebo také ve formě ploché desky [2].



Obr. 2 Schéma principu elektrostatického zvlákňování – vertikální kapilára [2]

Technologie NanospiderTM

Základem procesu je idea, že Taylorovy kužele mohou být vytvořeny i na tenké vrstvě polymerního roztoku. Nejsou zde potřebné kapiláry, jako to bylo u předchozích výrobních zařízení pro výrobu vláken. Tím se dosahuje mnohonásobně vyšší produkce pro využití v průmyslové výrobě. Ke zvlákňování se používají vodorozpustné polymery, a to bez použití často toxických rozpouštědel, což vede ke splnění požadavků ekologické ochrany životního prostředí. Není však vyloučeno použití i nerozpustných polymerů ve vodě. Toto zařízení je použitelné pro výrobu nanovláknenných vrstev o průměrech 50 až 200 nanometrů [3].



Obr. 3 Zařízení NanospiderTM se skládá z polymerního roztoku (1), váleku (2), kolektoru (3), zásobníku (4), pokladové textilie (5), odvíjecího zařízení (6), navíjecího zařízení (7) [3]

Zařízení se sestává z váleku (2) ponořeného v zásobníku (4) s polymerním roztokem (1). Válek (nabitá elektroda) se otáčí úhlovou rychlostí a přejímá na svůj povrch tenkou vrstvu polymerního roztoku. Naproti váleku se nachází uzemněný kolektor (protielektróda) (3). Ve volném prostoru mezi elektrodami se vytváří silné elektrostatické pole (8). Z povrchu polymerního roztoku vznikají v důsledku vysoké intenzity elektrického pole velmi stabilní Taylorovy kužele, představující primární tvorbu nanovláken. Nanovlákná jsou formována, odloučena v důsledku působení elektrického pole ke kolektoru, snímána na povrch pokladové textilie (5) z odvíjecího zařízení (6) a namotávána na navíjecí zařízení (7). Unášení vzniklých nanovláken od nabité elektrody k protielektrodě je podporováno proudem vzduchu nasávaného z vnějšího prostoru do vakuové komory (9). Proud vzduchu prochází podél zásobníku s polymerním roztokem a nabité elektrody skrz podkladovou textilií k protielektrodě [3].

2.1.4 Vliv parametrů na elektrostatické zvláknění

Parametry určující a ve velké míře ovlivňující proces elektrostatického zvláknění i morfologii výsledných nanovláken. Rozdělují se na parametry procesní a systémové.

Do procesních parametrů zařazujeme elektrickou vodivost, dielektrické vlastnosti polymeru, velikost elektrického napětí a pole, vzdálenost kapiláry od kolektoru, teplota, vlhkost.

Systémové parametry se týkají vlastností zvlákněného materiálu. Patří sem molekulová hmotnost, distribuce molekulové hmotnosti, hustota, povrchové napětí, koncentrace, viskozita, viskoelasticita, rychlost odpařování rozpouštědla, přísady aditiv.

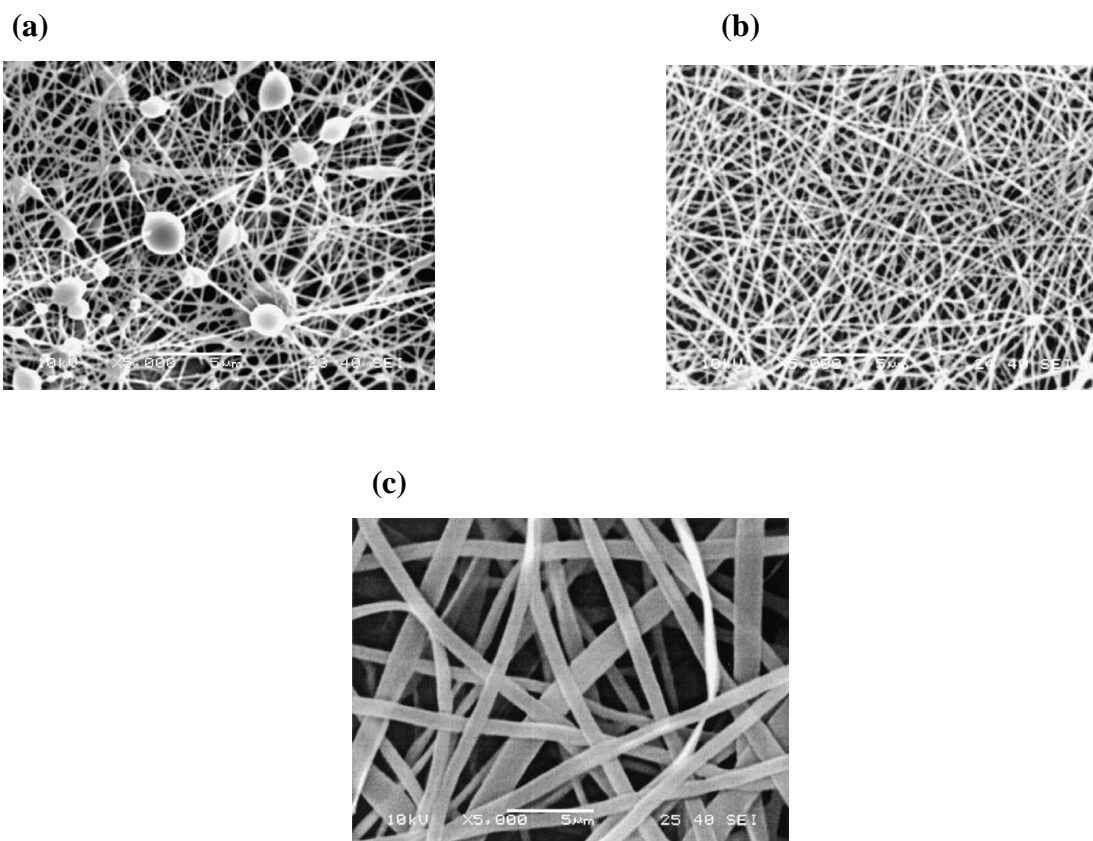
Pro každý materiál je nutné najít optimální hodnoty parametrů, při kterých je možné vytvořit vlákna [1]. Dále budou popsány parametry polymerních roztoků pro elektrostatické zvláknění, protože jsou používány ve větší míře než polymerní taveniny.

Vliv koncentrace a viskozity polymerního roztoku

Koncentrace polymerního roztoku má obecně vliv na průměr, tvar kapky a morfologii vlákna. Se zvyšující se koncentrací roztoku narůstá průměr vlákna. Viskozita je dominantní proměnnou, která je funkcí koncentrace. Čím větší je koncentrace, tím bude roztok viskóznější. Nízká viskozita vykazuje vlivem povrchového napětí tvorbu kapek místo vláken. Tedy koncentrace nesmí klesnout pod určitou mez. V případě velké viskozity, pochopitelně i koncentrace, je potíže se zpracovatelností, v důsledku špatné ovladatelnosti toku roztoku ke špičce kapiláry [2].

Vliv molekulové hmotnosti

Na průměru výsledného vlákna se podílejí nejen koncentrace roztoku, elektrické napětí, ale i molekulová hmotnost polymeru. Koncentrovanější polymerní roztoky s vyšší molekulovou hmotností zvyšuje průměr vláken. Nízká molekulová hmotnost vykazuje stejný jako nízká koncentrace kruhový průřez vlákna. V experimentech prováděných autory článku [4] (Koski a spol.) zkoumali vliv molekulové hmotnosti PVA na elektrostatické zvláknění. Popisují, že při molekulových hmotnostech 9000 - 13 000 g/mol, vlákněná struktura vykazuje koráلكové defekty obr. 4 (a). Zvýšením molekulové hmotnosti k 13 000-23 000 g/mol dojde ke stabilizaci vlákněné struktury obr. 4 (b). Při hodnotách molekulových hmotností 31 000 – 50 000 g/mol jsou pozorována plochá vlákna obr. 4 (c). Významně vzrostl průměr vláken na (1 - 2μm) i velikosti pórů [4].



Obr. 4 Vlákněné struktury získané z elektrostatického zvláknění PVA odlišných molekulových hmotností [4]

Vliv povrchového napětí

Povrchové napětí napomáhá vzniku tzv. korálových defektů. Redukce korálových defektů je možná snížením povrchového napětí nebo vhodnými aditivy. Snížení povrchového napětí podpoříme přidáním povrchově aktivních látek do roztoku. Navíc napomáhají k rovnoměrnějším vláknům. Výhodné je i výběr rozpouštědla, např. etanol se vyznačuje nízkým povrchovým napětím a přispívá k výrobě hladkých vláken [1].

Vliv elektrického napětí

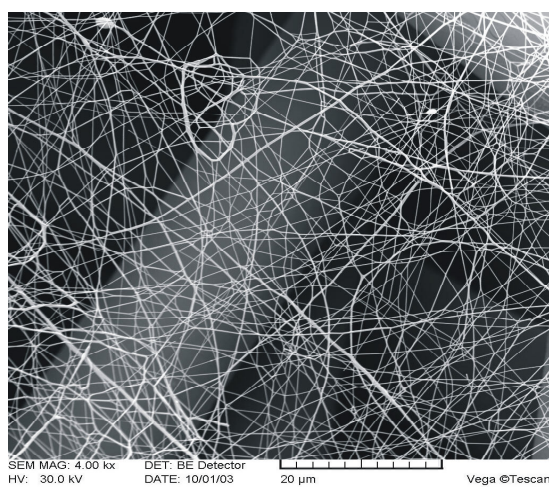
Zásadním prvkem elektrostatického zvláknění je použití vysokého napětí na polymerní roztok. Vysoké napětí poskytne zvláknovací trysce potřebný náboj pro transport proudu a formování kapítek. Zvyšováním elektrického napětí dochází ke snižování objemu kapky, ústupu kužele a následnému vzniku proudu z kapalného povrchu uvnitř injekční špičky. Tvar kapky na konci kapiláry se mění v závislosti na podmínkách zvláknění (elektrické napětí, viskozita, rychlost dávkování). Aplikováním většího napětí dochází k tomu, že proud roztoku vychází přímo z konce kapiláry bez viditelné kapky i kužele. Tudíž se zvyšujícím se napětím roste hustota korálových defektů a vláknový průměr, protože elektrické napětí vyprodukuje více kapaliny [2].

Vliv vzdálenosti kolektoru od kapiláry

Vzdálenost kolektoru od kapiláry má vliv na vláknitou strukturu zejména na průměry vláken. Čím větší je vzdálenost mezi kapilárou a kolektorem, tím jsou průměry vláken menší. Naopak se snižující se vzdáleností se mohou objevovat kapky namísto vláken [1].

2.2 Nanovláknna

Nanovláknna jsou obecně délkové útvary vyznačující se průměrem ve velikostech atomů a molekul. Jak bylo v kapitole 2.1 popsáno, průměry nanovláken se pohybují v řádech 100 nanometrů. Pro představu je jeho průměr tisíckrát menší než lidský vlas. Pod běžnými světelnými optickými mikroskopy nejsou jednotlivá nanovláknna viditelná, protože jejich průměr je menší než vlnová délka světla (400 – 750 nm). Viditelná jsou pouze pod elektronovým mikroskopem [5].



Obr. 5 Spleť nanovláken [5].

2.2.1 Vlastnosti

Vzhledem k extrémně malým rozměrům mají nanovláknna mnoho výjimečných vlastností, jako je velký specifický povrch, velkou pórovitost vláknenné vrstvy a malý rozměr pórů.

Zcela unikátní vlastnosti jsou využívány v mnoha aplikacích jako vysoce účinné filtry zachycující bakterie, kompozitní materiály, součásti ochranných oděvů, v biomedicíně jako náhrada lidských orgánů, v automobilovém průmyslu pro schopnost dobré absorpce zvuku atd. [5].

Geometrické vlastnosti

Do této kategorie spadají průměry vláken, distribuce vláken, orientace, úhly, poróznost. Tyto geometrické charakteristiky ovlivňují mimo jiné, výsledné vlastnosti nanovláknenných vrstev. Geometrické charakteristiky lze jednoduše měřit za pomoci speciálních elektronových mikroskopů. Jde tedy o AFM (atomic force microscopy), SEM (scanning electron microscopy), FESEM (field emission scanning electron microscopy), TEM (transmission electron microscopy).

2.2.2 Aplikace nanovláken

Nanotextilie díky svým unikátním vlastnostem přináší nové možnosti v daném oboru. Uplatnění najdou v medicíně, stavebnictví, ve filtraci atd.

Medicína

V této části bude popsáno několik možných aplikací nanovláknenných materiálů využitelných v medicíně s ohledem na obvazoviny a ochranné roušky.

Obvazoviny

Na ošetření zranění, popálenin, kde lze aplikovat nanovláknena z biodegradabilních polymerů vhodné pro medicínu. Zafixování pomocí elektrického pole vyprodukuje nanovláknena přímo na místo, kde se vyskytuje zranění. Vznikne vláknitý podložený obvaz podporující hojení ran a napomáhá utváření rány. Nezpůsobuje tvorbu jizvové tkáně jako při běžném ošetření. Nanovláknenné membrány pro obvazový materiál obsahují dostatečně malé póry o velikostech 500 nm až do 1 μm , které zabráňují přniku bakterií [1].



Obr. 6 Tvorba obvazové vrstvy přímo na kůži [2]

Ochranné roušky

Vhodnými kandidáty pro výrobu roušek jsou nanovlákná, která jsou schopna díky obrovskému množství malých pórů filtrovat vzduch a zachytávat bakterie. Nanovlákná se často kombinují s částicemi stříbra, jejíž antibakteriální aktivita vede k usmrcení virů. Negativní vlastností respirátoru je nepohodlnost při dlouhodobém nošení. Chen z Washington University vyvinul tenký nanovláknenný materiál, který je složen z 2% materiálu a 98% vzduchu. Takto vyrobený respirátor je efektivnější a příjemnější na nošení [2].

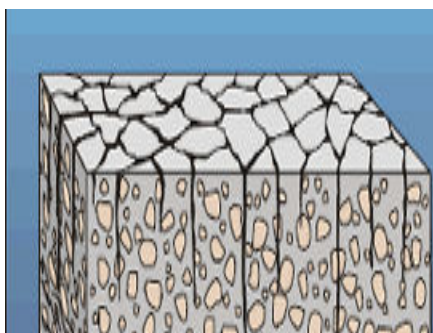


Obr. 7 Ochranné roušky [2]

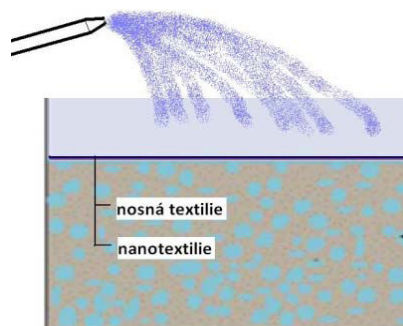
Stavebnictví

Pro ošetření povrchu beton se používá dvouvrstvý systém, nanotextilie a nosné textilie. Takto upravené povrchy lépe odolávají vzniku trhlin. Nanotextilie v betonové vrstvě má za následek výrazné omezení odpařování povrchových vrstev. Nosná textilie přispívá k omezení vzniku trhlin. Po ztuhnutí betonové směsi je v případě potřeby možnost nosnou textilií odstranit. Nanotextilie však ve struktuře přetrvává. Identifikace nanotextilie se pozná tím, že vysychání konstrukce bude pomalejší [6].

(a)



(b)



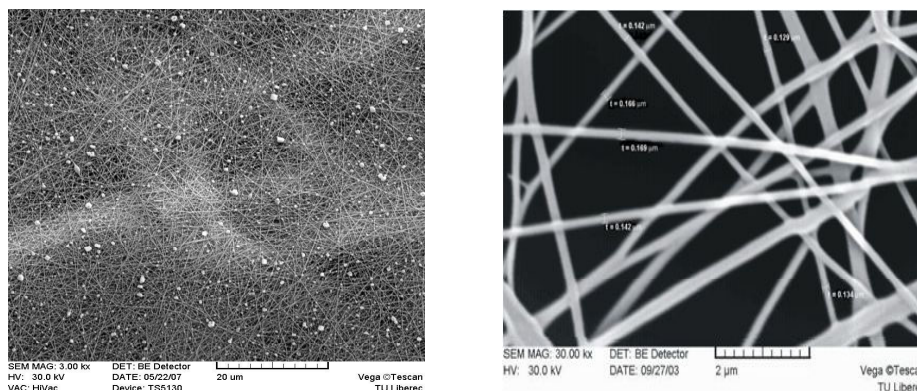
Obr. 8 Trhliny na povrchu betonové vrstvy (a) a betonová vrstva s použitím textilií (b) [6]

Filtry

Důležitou roli ve filtraci hraje vnější povrch. Čím je vnější povrch vláken filtru větší, tím je pravděpodobnější zachycení částic o velikostech pod $0,5 \mu\text{m}$.

Vysoký vnější povrch zvyšuje tlakový spád vláknenného materiálu, protože filtrované médium je zabrzováno vlákny. Účinnost filtru zvyšuje také velké množství malých pórů, které zachycují malé částice v mezivláknenných místech jako pomyslné síto. Lze připravit nanovláknenné vrstvy s následnými úpravami poskytující póry o velikostech 100 nm.

Empiricky bylo zjištěno, že pro dosažení efektivních vlastností vláknenného filtru je dostačující plošná hmotnost $0,5 - 5 \text{ g/m}^2$ a tloušťka 10 - 30 μm . To znamená snížení nároků na objem a bezpečnost filtru (holografie...) [7].



Obr. 9 Nanovláknenná vrstva s částicemi o velikosti 0,02 – 2 μm (vlevo),
nanovláknenná vrstva bez nánosů (vpravo) [7].

2.3 Polymery používané pro elektrostatické zvlákňování

V současné době bylo úspěšně použito více než 50 druhů polymerů. Vzhledem k lepším zpracovatelským vlastnostem jsou více používány polymerní roztoky než taveniny. Taveniny jsou znevýhodněny velkou viskozitou a potřebou je zvlákňovat ve vakuu [2]. To má za následek horší formování vláken a navýšení jejich průměru. Polymerní roztoky mají několik nevýhod, nebo jsou použita rozpouštědla. Rozpouštědla jsou většinou toxická, a proto zdraví škodlivá. Pro stále se zvyšující nároky na ochranu životního prostředí jsou výhodnější vodorozpustné polymery, například polyvinylalkohol, které však jsou méně odolné ve vlhkém prostředí, a proto je nutné zpomalit proces síťování. V následující tabulce je uvedeno několik druhů elektrostaticky zvlákňovaných polymerů, a to ve formě roztoků nebo tavenin [2].

Polymer	Rozpouštědlo
Polyamid 6.6 (PA6.6)	Kyselina mravenčí
Polyurethan (PU)	Dimethylformamid
Polybenzimidazol (PBI)	Dimethylacetamid
Polykarbonát (PC)	Dichlormethan
Polyakrylonitril (PAN)	Dimethylformamid
Polyvinylalcohol (PVA)	Destilovaná voda
Kyselina polylaktová (PLA)	Dichlormethan
Polyethylen oxide (PEO)	Destilovaná voda
Polystyren (PS)	Dimethylformamid
Polymethylmethakrylát (PMMA)	Aceton
Polyethylen oxid (PEO)	Etanol
Polyamid (PA)	Dimethylacetamid
Acetát celulózy (CA)	Aceton
Polyethylenglykol (PEG)	Chloroform

Tab. 1 Elektrostaticky zvlákněné polymerní roztoky [1]

Polymer	Procesní teplota [°C]
Polyethylen (PE)	200 - 220
Polypropylen (PP)	220 - 240
Polyamid 12 (PA12)	220
Polyethylentereftalát (PET)	270
Polyethylenenaftalát (PEN)	290

Tab. 2 Elektrostaticky zvlákněné polymerní taveniny [1]

Z tabulek 1 a 2 vyplývá, že vedle běžných syntetických polymerů se využívá i tzv. biodegradabilních polymerů (kyselina polylaktová), které jsou zdravotně nezávadné a ekologicky odbouratelné. Jejich využití je zejména v medicíně jako nosiče pro růst buněk, pro kontrolovatelné uvolňování léků atd. [12].

Elektrostaticky lze zvláknit směsí polymerů tzv. „blends“. Jejich využití je velké pro svoji jednoduchou přípravu, nízkou cenu a širokou škálou úprav vlastností. Konkrétně nanovlákná vyrobená ze směsí polyamidu (PAD) a polyethylenu (PE) se dobře podílejí na zlepšení bariérových vlastností. [12]

Elektrostaticky lze zvláknit polymerní roztok s přísadkou malých nerozpustných částek, které jsou ve výchozím vláknu zapouzdřené. Tímto způsobem lze přidat do textilií z polymerních nanovláken rozpustné léky nebo bakteriální inhibitory [12].

2.4 Polyvinylalkohol (PVA)

Je syntetický polymer, který spadá do skupiny vinylových polymerů. Vznikají polymerací vinylových sloučenin mající obecný vzorec $-\text{[CH}_2\text{-CH]}_n-$ [8].

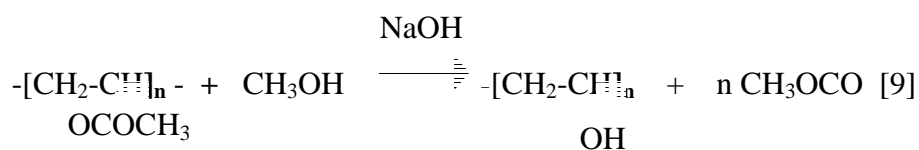
X

2.4.1 Výroba PVA

Polyvinylalkohol (dále PVA) se připravuje hydrolýzou nebo alkoholýzou polyvinylacetátu. Spadá do skupiny polymeranalogických reakcí. Je to polymer, u kterého neexistuje monomer. Konečný polyvinylalkohol obsahuje jen alkoholické skupiny, nebo určité množství acetátových skupin. Závisí tedy na způsobu výroby. Acetátové skupiny se podílejí na modifikaci a je možnou příčinou proměnných vlastností [8]. Při hydrolýze polyvinylacetátu probíhá následná chemická reakce:



Alkoholýza probíhá v kyselém nebo alkalickém prostředí za přítomnosti (methanolu nebo ethanolu). Alkalická alkoholýza polyvinylacetátu v methanolu dle rovnice (15 z diplomky -zjistit)



2.4.2 Struktura PVA

Jak bylo výše zmíněno, PVA obsahuje vždy určité množství acetátových skupin, které podmiňují jeho vlastnosti. Množství acetátových skupin je určeno stupněm hydrolyzy i alkoholýzy. PVA existuje ve dvou formách: plně a částečně hydrolyzované. Za plně hydrolyzovaný PVA je považován při obsahu méně než 1,5 mol % acetátových skupin a u částečně hydrolyzovaného PVA je to až 20 mol % acetátových skupin v molekule [9].

Lineární makromolekuly s polárními hydroxylovými skupinami jsou navzájem poutány silnými mezimolekulárními vazbami – vodíkovými můstky. Část hmoty je v krystalickém stavu. Tento podíl se zvyšuje se stoupajícím stupněm hydrolyzy [8]. Pokud jsou v polymerních řetězcích obsaženy koncové karboxylové skupiny CH_3COONa (Octan sodný), přispívají ke zvýšení vodivosti. [9].

2.4.3 Vlastnosti PVA

V této kapitole budou rozepsány vlastnosti PVA týkající se: viskozity, povrchového napětí, rozpustnosti, tepelných a mechanických vlastností.

Viskozita PVA

Viskozita je závislá na několika faktorech, jako je: stupeň hydrolyzy, molekulová hmotnost a koncentrace. Se zvyšujícím se stupněm hydrolyzy stoupá i viskozita polymeru. Tedy plně hydrolyzovaný PVA má vyšší viskozitu, než je částečně hydrolyzovaný PVA, i v případě, kdy je průměrný polymerní stupeň (PPS), koncentrace a teplota roztoku je stejná. S nárůstem molekulové hmotnosti a koncentrace roste viskozita roztoku. Ovšem s rostoucí teplotou se viskozita polymerního roztoku snižuje [8].

Povrchové napětí PVA

Povrchové napětí PVA roztoku se mění s koncentrací, stupněm hydrolyzy a s molekulovou hmotností. Distribuce acetátových skupin podél polymerního řetězce má také určitý vliv na povrchové napětí PVA. Pokud je rozmístění acetátových skupin rovnoměrné, tak povrchové napětí PVA narůstá [8].

Rozpustnost PVA

PVA je ve vodě rozpustný polymer. Rozpustnost ve vodě klesá s rostoucím počtem nehydrolyzovaných acetátových skupin [8]. Rozpustnost ovlivňuje také molekulová hmotnost, stupeň krystalinity a teplota. Polymer s více než 5 % obsahem vinylacetátových skupin se rozpouští ve vodě už při teplotách nad 65°C. Čím vyšší je jeho molekulová hmotnost, tím je menší jeho rozpustnost [9].

Silně orientované vlákno s vysokým krystalickým podílem je nerozpustné ve studené i teplé vodě, rozpouští se však ve vroucí vodě [8]. Odolává organickým kyselinám a ve vodných roztocích anorganických kyselin [9]. Rozpustnost ve vodě lze zvýšit použitím vodného roztoku fenolu. Naopak lze rozpustnost ve vodě snížit sesílením např. formaldehydem.

Teplotné vlastnosti PVA

Teplota skelného přechodu (T_g) se pohybuje v rozmezí 70 – 85 °C a teplota tání (T_t) 230 až 250 °C. [10].

Mechanické vlastnosti PVA

Pevnost v tahu je 35 až 50 MN.m⁻² a lze ji zvýšit několikanásobným dloužením za souřadné orientace až na 400 MN.m⁻². Prodloužení při přetržení závisí na stupni orientace a bývá u vláken 14 až 20% [8].

2.4.4 Použití PVA

Textilní prmysl

PVA se používá v mnoha aplikacích, jako šlichty, tzv. ochranné koloidy (stabilizátor disperzí), jsou součástí tiskacích barev, textilních pomocných přípravků a záhustek [8]. PVA je vláknotvorný a vlákna z něj vyrobená jsou pružná a odolná (chirurgické nit, síť, lana) [10].

Ostatní aplikace

PVA je přísadou zubních past, kosmetických přípravků, lepidel, fotografických emulzí, fólií a obalových materiálů [10].

2.5 Elektronová a světelná mikroskopie

Elektronová mikroskopie slouží k pozorování objektů, v našem případě vláknenné struktury, a to při velkých zvětšení. Elektronový mikroskop je v podstatě podobný světelnému mikroskopu. Elektronový mikroskop nepracuje se světelným paprskem jako světelný mikroskop, ale využívá svazek elektronů urychlených pomocí elektrického pole. Dále místo skleněných objektů využívá elektromagnetické ohyby. Vzhledem k tomu, že urychlené elektrony mají menší vlnovou délku, a to i o několik řádů, vlnové délky fotonů viditelného světla tak umožní i tisíckrát větší rozlišení. [11].

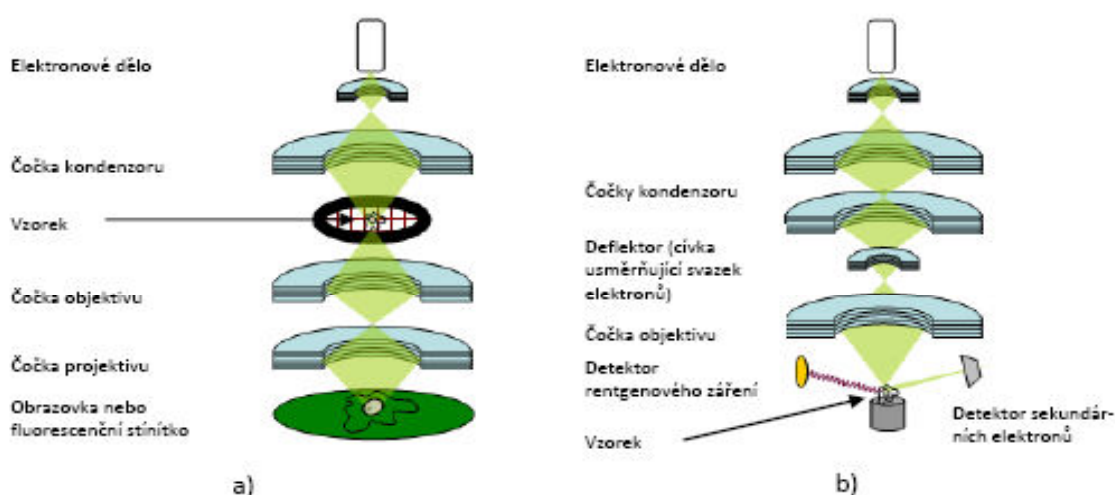
V současnosti existuje několik typů elektronových mikroskopů. Základními typy jsou transmisní (prozařovací) elektronový mikroskop (TEM – Transmission Electron Microscope) a skenující (rastrovací, řádkovací) elektronový mikroskop (SEM – Scanning Electron Microscope, případně REM) [11].

TEM – Transmission Electron Microscope

Transistní elektronový mikroskop zobrazuje objekt pomocí svazku elektron vyza ené elektronovou tryskou (elektronové d lo) skrz vzorek. Kvalita zobrazování se tedy odvíjí od tlouš ky vzorku (do 100 nm). Pomocí elektromagnetické o ky, která je sou ástí objektivu a projektilu dochází, k fokusaci a zv tšení obrazu. Obraz je snímán v tšinou na monitoru. Pro lepší zobrazovací schopnost se používají atomy kov . Pro zobrazení je nutno ješt pracovat ve vakuu, protože na vzduchu by došlo k pohlcování elektron . Rozlišovací schopnost TEM je okolo 0,2 nm; speciálními typy TEM lze dosáhnout meze rozlišení 0,1 nm [11].

SEM – Scanning Electron Microscope

Skenovací elektronový mikroskop je dalším typem, který je schopný vizualizovat nanovlákná. Pracuje na principu úzkého elektronového svazku, p i emž je vlivem elektromagnetického vinutí zaost en na vzorek a bod po bodu skenuje jeho povrch. Svazek elektron již neprochází vzorkem jako u TEM, ale sjednocují s povrchem vzorku a vytvá ejí identifikovaný signál pro zobrazení. V tomto p ípad se také pracuje ve vakuu. Dosahuje maximálního rozlišení „pouze“ asi 1 nm. [11].



Obr. 10 Schematické nákresy TEM (a) a SEM (b) [11].

2. 6 Obrazový analyzátor NIS ELEMENTS 3.0

NIS ELEMENTS 3.0 je velice používaným softwarem určeným pro obrazovou analýzu od české společnosti Laboratory Imaging, s.r.o. Prostřednictvím tohoto softwaru lze snímat, archivovat a ručně nebo automatizovaně měřit vzorky. Možností softwaru je načíst snímky i z elektronového mikroskopu. V našem případě jde o měření průměru a úhlu sklonu vláken. Periferní zařízení snímacího systému může obsahovat optický mikroskop, kameru, digitální fotoaparát, PC a softwarové vybavení. NIS ELEMENTS existuje v několika verzích, které jsou doplněny prvky zefektivující práci v obrazové analýze [11].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ÁST

Cílem experimentu bylo zjistit, zda navržené modifikace zařízení ovlivují nanovláknou strukturu, případně jaké vlastnosti z této struktury vyplývají. Předmětem pozorování byl vliv systémových a zejména procesních parametrů na tvorbu nanovlákných vrstev. Ze systémových parametrů byl pozorován vliv koncentrace polymerního roztoku a procesních parametrů, vzdálenost i sklon kolektorů.

K vyhodnocení vzniklých nanovlákných struktur byla použita elektronová a světelná optická mikroskopie k pořízení snímků, které byly následně zpracovány pomocí obrazové analýzy NIS-elements 3.0. Proměřeny byly především průměry, porézita a distribuce nanovláken ve vrstvách.

3.1. Příprava a složení roztoku PVA

Příprava roztoků probíhala na základě mísení 16% roztoku PVA s destilovanou vodou. Účelem přípravy roztoků bylo dosažení požadovaných koncentrací, a to 8% vodný roztok PVA, 12% vodný roztok PVA, 16% vodný roztok PVA.

Na základě hmotnostního pravidla byl proveden výpočet jednotlivých složek, pro celkový objem 20 ml. V tab. 3 jsou znázorněny jednotlivé hodnoty koncentrací roztoku PVA.

Tab. 3 Přehled koncentrací roztoků PVA

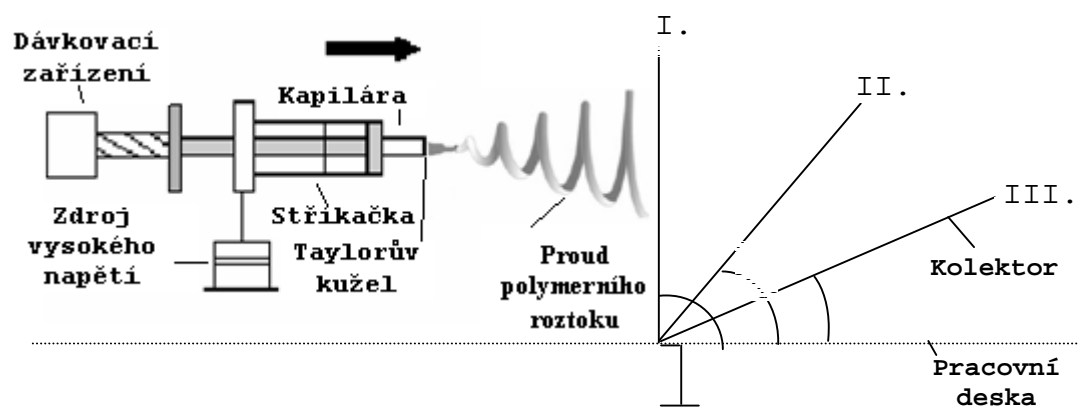
Výsledná koncentrace PVA [%]	Množství PVA [ml]	Množství H ₂ O [ml]
8%	10	10
12%	15	5
16%	20	

3.2. Za ízení pro elektrostatické zvlák ování

Základem za ízení pro elektrostatické zvlák ování je injek ní st íka ka se zvlák ovací jehlou, dále kolektor í soustava kolektor , dávkovací za ízení a zdroj vysokého nap tí. Obecné schéma, ze kterého se vycházelo je znázorn no na obr.1. Hlavním úkolem experimentu bylo zjistit, zda zm ny v nastavení kolektoru í kolektor budou mít vliv na výslednou nanovláknennou strukturu. Variace v nastavení kolektoru, ze kterými se pracovalo, je uvedeno na níže uvedených obrázcích. Ve všech pokusech byla poloha injek ní st íka ky se zvlák ovací jehlou fixní. Parametry procesu elektrostatického zvlák ování byly voleny pro každé nastavení zvláš , pro docílení zvláknitelnosti roztok . V p ípad jednoho kolektoru byly zvlákn ny všechny uvedené koncentrace. Soustava kolektor tvo íla nad rámec této práce, proto byla použity jen jedna koncentrace, a to 12 % roztok PVA.

Vertikáln naklán ný kolektor

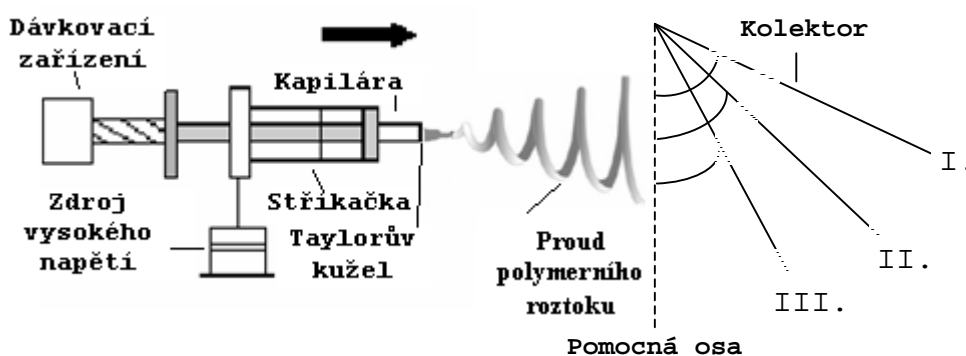
Z obr. 11 je z ejmé, že poloha kolektoru je postupn sklán na sm rem k pracovní desce. Po každé sérii zvlákn ných roztok se kolektor sklonil o ur itý úhel. Úhel sklonu byl volen u tohoto pokusu po 30° sm rem k pracovní desce. Pro ukládání nanovláken byl použit tmavý podkladový papír.



Obr. 11 Schéma nastavení kolektor sm rem k pracovní desce – vertikáln naklán né

Horizontálně naklánný kolektor

První poloha kolektoru byla dána úhlem 60° vzhledem k pomocné ose. Ve druhé poloze se kolektor nacházel pod úhlem 40° . Tato poloha odpovídala 20° . Na každý skloněný kolektor byl upevněn tmavý podkladový papír, na který se ukládala nanovláknena.

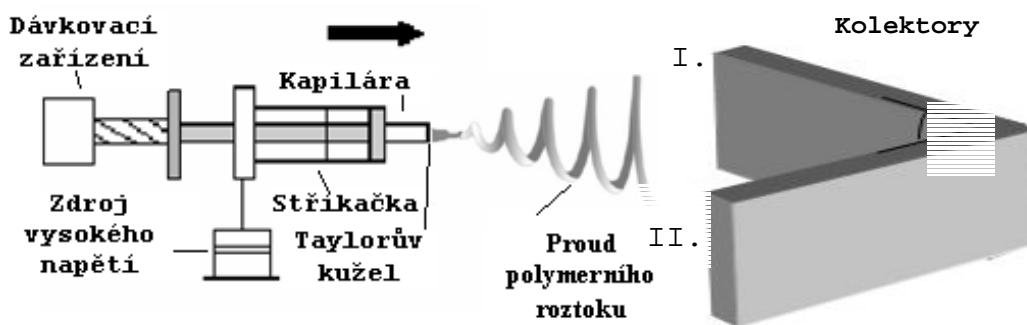


Obr. 12 Schéma nastavení kolektor vzhledem k pomocné ose – horizontálně naklánné

Dva kolektory odkloněné do stran

Na obr.13 jsou znázorněny kolektory I. a II., jejichž odklonění do stran je dán úhlem odklonu. Na oba kolektory se upevnila tmavé podkladové papíry, které byly určeny pro snímání vláknenných vrstev. V procesu elektrostatického zvlákování se nanovláknena orientovala do stran a ukládala na tmavé podkladové papíry. Orientace nanovláken převládalo spíše do pravé strany, tedy kolektoru I. Z makrohlediska koncentrace nanovláken na kolektoru I. je mnohonásobně větší než u kolektoru II. Na tmavý podkladový papír, připevněný na kolektoru I., se vlákna ukládala do tvaru připomínající kruh viz. poloha. Tento kruh lze dále rozdělit na tzv. vnější a vnitřní kruh. Koncentrace vláken ve vnitřním kruhu je podstatně větší než v kruhu vnějším.

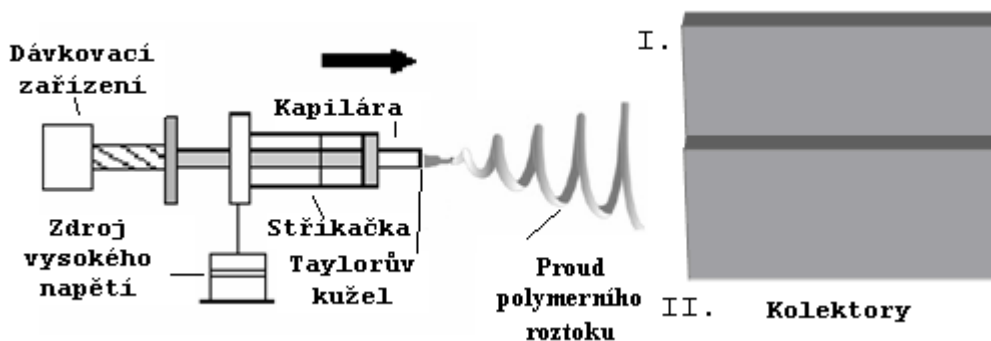
V případě kolektoru II. se nanovlákná ukládala na tmavý podkladový papír ve tvaru připomínajícího kruh, kde jejich koncentrace byla srovnatelná s koncentrací ve vnějším kruhu kolektoru II. Pro nahlédnutí jsou pořízené snímky položeny v příloze.



Obr. 13 Schéma dvou kolektorů odkloněných do stran

Paralelně postavené kolektory

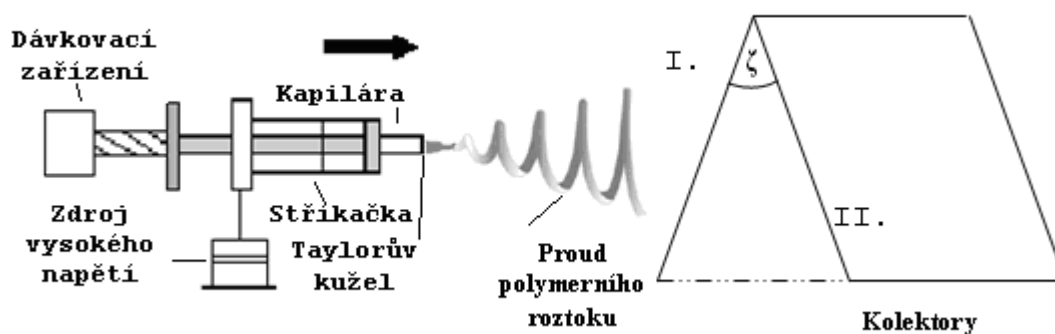
V tomto případě postavení kolektorů bylo voleno paralelně. Orientace vláken je podobná, viz výše popsané nastavení kolektorů. Vlákná se převážně orientovala na tmavý podkladový papír prvního kolektoru ve tvaru, který připomíná tzv. „hříb“. Takto pomyslný hříb lze rozdělit na hlavní části: klobouk a tělo. Koncentrace vláken v klobouku odpovídá koncentraci vláken v těle pomyslného „hříbu“. Na tmavém podkladovém papíru druhého kolektoru se nanovlákná orientovala do tvaru připomínajícího kruh jako výše uvedený nastavení kolektorů.



Obr. 14 Schéma paralelně postavených kolektorů

Kolektory postavené šikmo

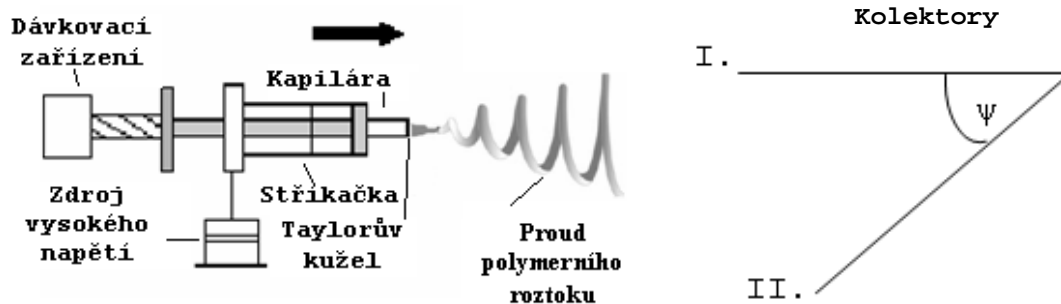
Kolektor I. a kolektor II. jsou k sobě postavené do šikmého směru. Oba kolektory spolu svírají úhel ζ . Proud nanovláken se spíše orientoval do pravého směru na tmavý podkladový papír, který byl upevněn na kolektor II. Platí tedy, že koncentrace vláken na tmavém podkladovém papíru kolektoru II. je větší než koncentrace nanovláken na tmavém podkladovém papíru kolektoru I. Jak bylo zmíněno výše, uvedené nastavení kolektorů podmínilo ukládání vláken do charakteristického tvaru, kdežto toto nastavení formuje nanovlákná do nepravidelného tvaru.



Obr. 15 Schéma šikmo postavených kolektorů

Horizontálně postavený a nakloněný kolektor

Kolektor I. byl postaven do horizontálního směru a k němu postaven nakloněný kolektor. Kolektor I. a II. svírají úhel ζ . Proud nanovláken se z větší části ukládal na tmavý podkladový papír kolektoru I. do tvaru tzv. „hříbu“, který byl zmíněn v paralelně nastaveném kolektoru. Shodný tvar polokruhu nanovláknenné vrstvy se jevil i na tmavém papírovém podkladu kolektoru II.



Obr. 16 Schéma horizontálně postaveného a nakloněného kolektoru

3.3. Vyhodnocení nanovláknenných struktur

K vyhodnocení vzniklých nanovláknenných struktur byly použity snímky z rastrovacího elektronového mikroskopu Phenom a světelného optického mikroskopu Nikon. Vzhledem k tomu, že jednotlivá nanovláknna jsou viditelná pouze pod elektronovým mikroskopem, protože jejich vlnová délka je menší než vlnová délka viditelného světla. Proto byl optický mikroskop použit jen na pořízení snímků nanovláknenné vrstvy. Vyhodnocení takto pořízených snímků se provádělo pomocí obrazové analýzy NIS ELEMENT 3.0. Obrazová analýza se týkala geometrických faktorů, jako je poróznost, distribuce a průměr nanovláken.

3.3.1 Poróznost

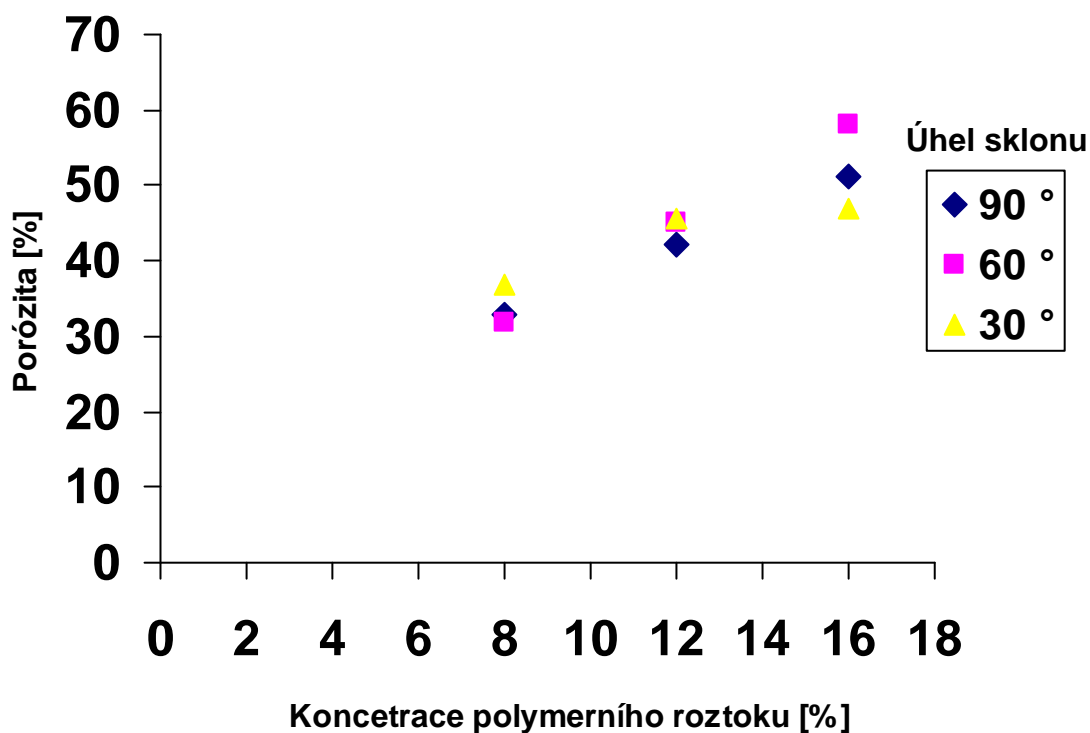
Poróznost je geometrickým faktorem potřebným pro chování a popis nanovláknenné struktury. Součtem všech ploch mezivláknenných pórů získáme výslednou poróznost. Výpočet poróznosti byl proveden na základě plošného zakrytí nanovláknny. Plošné zakrytí vychází ze znalosti plochy vláken a celkové plochy snímku. Jejím rozdílem lze vypočítat poróznost.

$$P = \left(1 - \frac{S_p}{S_c} \right) \cdot 100 [\%],$$

kde S_p značí celkovou plochu vláken a S_c celkovou plochu snímku [13]

Analýza nanovláknenné porózy -vertikáln naklánný kolektor

Obrazová analýza prokázala, jak je uvedeno v grafu 1, že se stoupající koncentrací roste poróza nanovláknenné vrstvy. Další faktor, který k tomu přispívá, je úhel sklonu kolektoru. Modré body grafu 1 odpovídají postavení, kdy kolektor svírá úhel s pracovní deskou, což je 90° . Je patrné, že poróza při 90° sklonu kolektoru s koncentrací narůstá. Sklon kolektoru o 30° na 60° (úhel) zastupují červené body v grafu 1. Opět s koncentrací polymerního roztoku poróza narůstá. Kolektor skloněný na úhel (30°) výrazně narůstá v rozmezí 8% až 12% koncentrací roztoku. V rozmezí 12% až 16% roztoku poróza pozvolna narůstala.



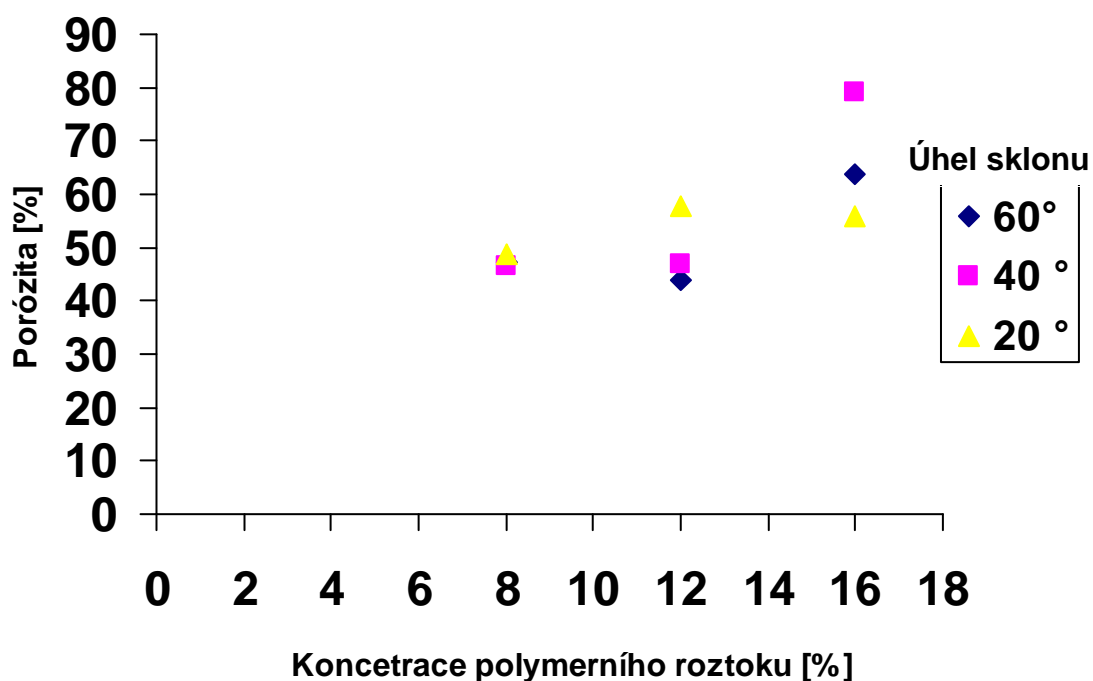
Graf 1 Vliv koncentrace roztoku PVA a úhlu sklonu vertikálně naklánného kolektoru na porózu nanovláknenné vrstvy

Tab. 4 Poróžita – naměřené hodnoty

Koncentrace roztoku [%]	Poróžita [%] / Úhel sklonu [°]		
8	32,83 / 90	31,7 / 60	36,97 / 30
12	42,17 / 90	44,98 / 60	45,6 / 30
16	51,1 / 90	58,13 / 60	46,98 / 30

Analýza nanovláknenné poróžity - horizontálně nakláňný kolektor

Poróžita při 60° sklonu kolektoru se zvýšenou koncentrací mírně klesá a pak rapidně vzrostla. Stejně se jeví i úhel sklonu (40°). Úhel sklonu (20°) podle naměřených dat zvyšuje nanovláknennou poróžitu s rostoucí koncentrací do určité míry a pak mírně klesá. Šedesátí a čtyřicetistupňové nastavení kolektoru vykazují stejné chování, přičemž ovlivňují poróžitu jinak, než je to u postavení při 20° stupních.



Graf 2 Vliv koncentrace roztoku a úhlu sklonu horizontálně nakláňného kolektoru na poróžitu nanovláknenné vrstvy

Tab. 5 Porózita – naměřené hodnoty

Koncentrace roztoku [%]	Porózita [%] / Úhel sklonu [°]		
8	47,35/60	46,43/40	48,84/20
12	43,75/60	47,05/40	57,64/20
16	63,66/60	79,22/40	55,8/20

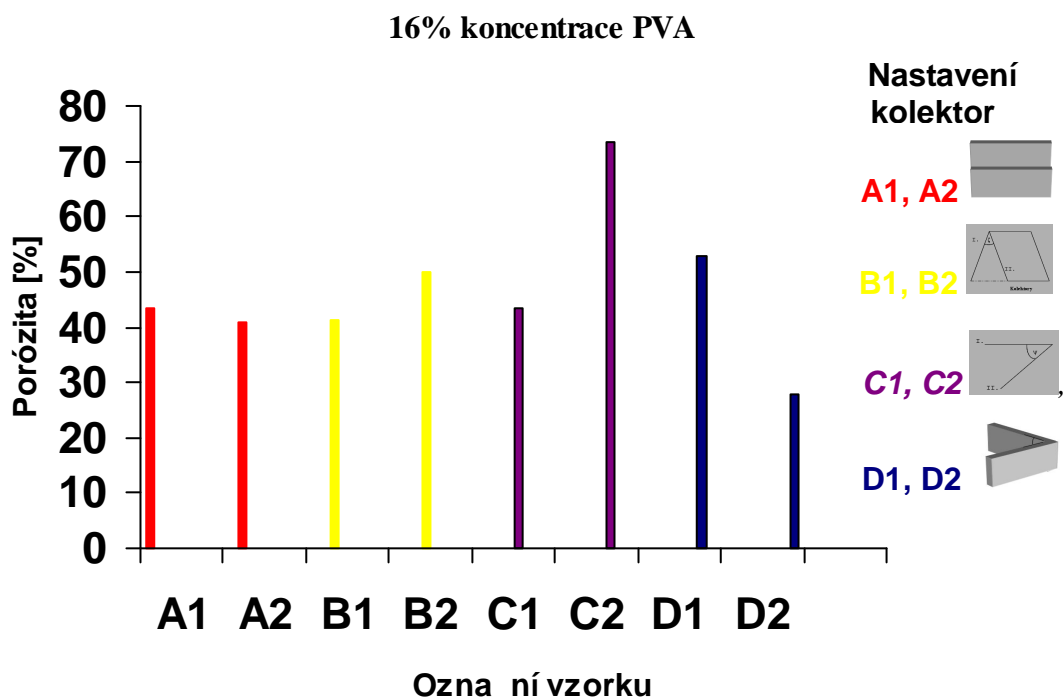
Analýza nanovláknenné porózy za použití soustavy kolektor

červené sloupce v grafu 3 zastupují paralelní postavení kolektorů I. a II., na niž byly vytvořeny vzorky A 1 a A 2. Porózita vzorku A 1 prvního kolektoru je mírně vyšší, než u vzorku A 2.

Sloupce žluté barvy ilustrují šikmé postavení kolektorů s úhlem sklonu 45°. Porózita se evaluuje ve vzorku B 2 druhého kolektoru nad vzorkem B 1 prvního kolektoru. Plocha, kde se koncentrují vlákna ve vzorku B 2, je podstatně větší než, je to u vzorku B 1.

Fialové sloupce v grafu 3 odpovídají kolektoru I. horizontálně postaveného a kolektoru II., který byl k němu postaven s nakloněním. Tímto kolektory byly vytvořeny vzorky C 1 a C 2. U tohoto postavení platí, že nanovláknenná porózita u vzorku C 1 < C 2. Plocha vzorku C 1 je více obsažená vlákny než plocha ve vzorku C 2.

Žluté sloupce zahrnují postavení, kdy jsou od sebe kolektory I a II. odkloněné do stran s úhlem odklonu 45°. Porózita vzorku C 1 je větší než u vzorku C 2, což platí i u plochy zahrnující vlákna.



Graf 3 *Vzájemné porovnání porózit jednotlivých vzork*

Tab. 6 *Nam ěné hodnoty porózy vzork*

Koncentrace roztoku [%]	Porózita [%]			
	Vzorek			
	A 1	A 2	B 1	B 2
16	43,41	40,99	41,15	50
	C 1	C 2	D 1	D 2
	43,6	73,1	52,98	27,7

Diskuze výsledků analýzy nanovlákněné porózity

Co se týče porózity, tak při vertikálně nakláněném kolektoru porózita narostala s koncentrací a úhlem sklonu. Nejvyšší porózity se dosáhlo při použití 16 % roztoku se 60° sklonem kolektoru (vzorek K3). Nejnižší hodnoty vykazuje 8% roztok a 60° stupňové nastavení kolektoru (vzorek K1).

V případě horizontálně nakláněného kolektoru se hodnoty nanovlákněné porózity zvyšují s koncentrací roztoku a snižujícím se sklonem kolektoru. Nejvyšší hodnota se získala při použití 16 % roztoku a úhlu sklonu 40° (vzorek N3) a nejnižší hodnota při 12 % roztoku a 60° skloněném kolektoru (vzorek O2). Tyto výsledky zahrnují použití jednoho kolektoru.

Nejvyšších hodnot nanovlákněné porózity při použití dvou kolektorů dosahovalo nastavení, kdy byl kolektor postaven horizontálně a k němu přistaven nakloněný kolektor. Přesněji se tato hodnota týká vzorku C2 nakloněného kolektoru. Nejnižší hodnota dosahuje při nastavení dvou kolektorů do stran, vzorku s označením D2 (kolektor 2).

Celkové shrnutí hodnot nanovlákněné porózity je uvedeno v tabulce 7. Celkově nejvyšší naměřená hodnota dosáhla v nastavení horizontálně nakláněného kolektoru (vzorek N3) a nejnižší hodnota u dvou kolektorů nakloněných do stran (vzorek D2).

Tab. 7 Naměřených hodnot nanovlákněné porózity

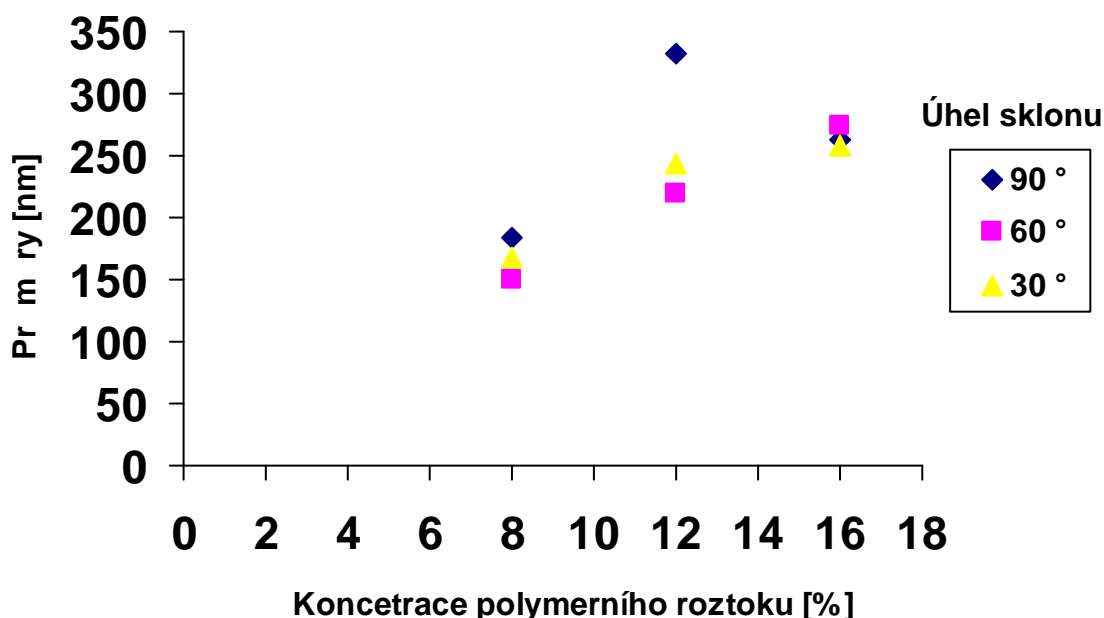
Porózita [%]		Počet kolektor	Vzorek
Nejvyšší hodnoty	79,22	1	N 3
	73,31	2	C 2
Nejnižší hodnoty	31,7	1	K 1
	27,7	2	D 2
Celková nejvyšší hodnota	79,22	1	N 3
Celková nejnižší hodnota	27,7	2	D 2

3.3.2. Průměr nanovláken

Dalším geometrickým faktorem jsou průměry nanovláken, které byly podrobeny analýze za pomoci programu NIS ELEMENTS 3.0. Měření průměrů vláken se prováděla na snímcích vytvořené z rastrovacího elektronového mikroskopu Phenom za 5.000 násobného zvětšení. Naměřené hodnoty jednotlivých nastavení jsou znázorněny v níže uvedených grafech. Podmínkou sledování byl vliv parametrů: koncentrace roztoku, poloha kolektoru a úhlu sklonu.

Průměr nanovláken při vertikálním naklání kolektoru

Hodnoty získané z 90° postavení kolektoru v pracovní desce rychle zvětšovaly průměry vláken do 12% roztoku. Průměry vláken s dalším nárůstem koncentrace roztoku na 16% mírně klesly, avšak oproti 8% roztoku jsou pořád v řádově několika desítkách nanometrů. Kolektor skloněný na 60° vykazuje nárůst vláknitých průměrů s koncentrací roztoku jako u 90° nastavení. Tímto stupně nastavení kopíruje 60° nastavení. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 4. Průměry vláken a nejvíce vyskytované průměry vzhledem ke koncentraci a úhlu sklonu jsou zobrazeny v tabulce 10 a 11.



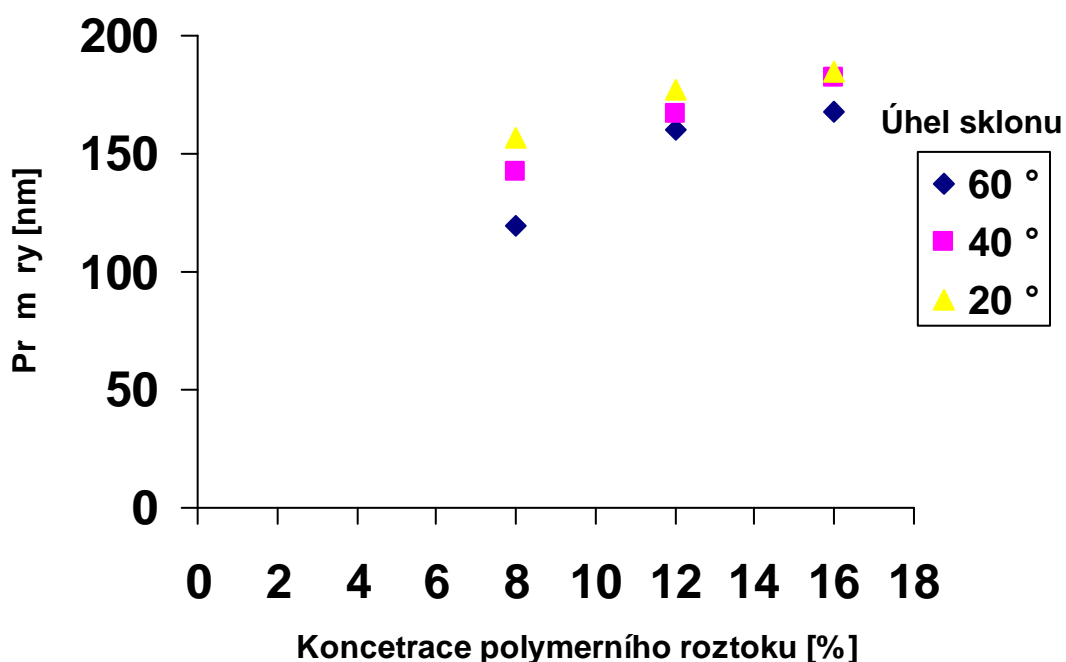
Graf 4 Vliv koncentrace roztoku a úhlu sklonu vertikálního naklání kolektoru na průměry nanovláken

Tab. 8 *Průměry nanovláken vertikálně nakláníného kolektoru*

Koncentrace roztoku [%]	Průměry [nm] / Úhel sklonu [°]		
8	183,11 / 90	149,78 / 60	167,54 / 30
12	332,42 / 90	220,09 / 60	242,85 / 30
16	262,61 / 90	274,48 / 60	257,67 / 30

Průměry nanovláken při horizontálně nakláníném kolektoru

Průměry nanovláken získané ze 60° nastavení kolektoru v *i* pomocné ose se zvyšovaly s rostoucí koncentrací roztoku, jakož to bylo u vertikálně nastaveného kolektoru. S dalším nastavením kolektoru na 40° a pak až na 20° se průměry zvyšovaly s koncentrací roztoku. Mimo koncentrace roztoku má vliv na průměry nanovláken i úhel sklonu, tedy pochopitelně vzdálenost od trysky ke kolektoru. Čím je tedy úhel sklonu větší vzhledem k pomocné ose, tak tím jsou průměry nanovláken nižší, a to z pravidla o několik desítek nanometrů. V níže uvedeném grafu 5 a tab. 12 jsou znázorněné střední hodnoty nanovláčkových průměrů.



Graf 5 *Vliv koncentrace roztoku a úhlu sklonu horizontálně nakláníného kolektoru na průměry nanovláken*

Tab. 9 *Průměry nanovláken horizontálně nakláněného kolektoru*

Koncentrace roztoku [%]	Průměry [cm] / Úhel sklonu [°]		
8	119,8 / 60	142,54 / 40	156,51 / 20
12	160,16 / 60	166,66 / 40	176,93 / 20
16	168,2 / 60	182,23 / 40	184,46 / 20

Zhodnocení výsledků průměrů nanovláken z hlediska užití jednoho kolektoru

Průměry nanovláken se s použitím jednoho kolektoru značně lišily. Nanovlákně průměry úzce souvisely v procesu elektrostatického zvlákňování s parametry, jako je koncentrace a úhel sklonu kolektoru. Nejnižších průměrů se dosáhlo u vzorku M1 za 8% koncentrace roztoku a 60° sklonu v horizontálně nakláněném kolektoru, kdy naměřená hodnota dosáhla 119,8 nm. Zatímco nejvyšší naměřený průměr 274,48 nm se vyskytl pochopitelně s nejkoncentrovanějším 16% roztokem při 60° sklonu kolektoru ve vertikálně nastavovaném kolektoru. Rozdíl mezi těmito průměry je na první pohled markantní.

Paralelní a šikmo postavení kolektory

Stejně hodnoty průměrů nanovláken ze vzorku A1 levého kolektoru postavené paralelně vyšly o několik desítek nanometrů vyšší, než je to u vzorku A2 pravého kolektoru. Stejně hodnoty průměrů nanovláken vzorků A1 a A2 se od sebe liší minimálně. Pravý kolektor z paralelně nastavených kolektorů se pozitivně uplatňuje k redukování průměrů nanovláken.

Vzorek B1 levého kolektoru se vyznačuje nízkými hodnotami průměrů oproti vzorku B2 pravého kolektoru. Levý kolektor šikmého nastavení kolektorů přispívá k redukcí průměrů nanovláken.

Horizontálně postavený a nakloněný kolektor b) dva kolektory odkloněné do stran

Stejně jako při šikmo postavených kolektorech se stejné hodnoty proumu nanovláken u vzorku C1 horizontálně postaveného kolektoru dosahovalo vyšších hodnot než u vzorku C2 nakloněného kolektoru. Proud proumu nanovláken vzorku označením C se od sebe liší přibližně o 100 nm, což je nejvyšší rozdíl při použití soustav kolektorů.

Ve stejném principu pokračuje i nastavení dvou kolektorů odkloněných do stran. Proud proumu nanovláken vzorku D1 levého kolektoru vyšly o několik desítek nanometrů menší než u vzorku D2 pravého kolektoru.

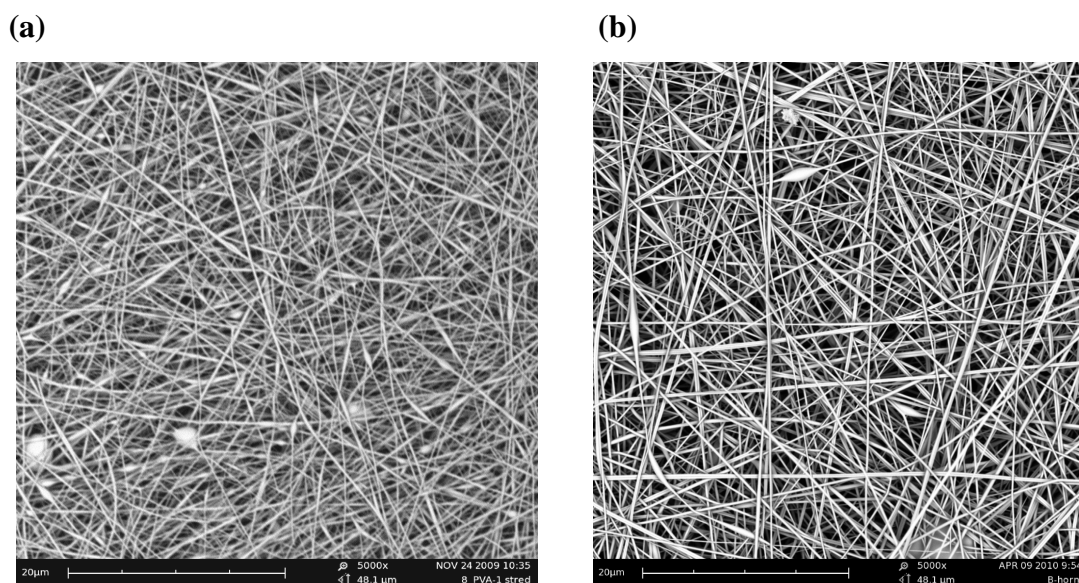
Zhodnocení výsledků proumu nanovláken při použití soustav kolektorů

Ve většině případů vykazovaly nižší hodnoty proumu nanovláken pravé kolektory nad levými. Jedinou výjimku tvoří nastavení s paralelními kolektory, kde se nižší hodnoty proumu nanovláken nacházely ve vzorku na levém kolektoru. Nejefektivnější se na redukci proumu nanovláken, za použití soustav kolektorů, podílel levý kolektor v šikmém nastavení. Stejná hodnota proumu nanovláken levého kolektoru ze vzorku B1 vyšla 178 nm. Avšak nejnižší hodnota u této varianty nastavení činí 154 nm. Opakovaná hodnota proumu nanovláken, tedy ta nejvyšší dosažená, vychází z nastavení, při němž kolektor je postaven horizontálně a k němu přistaven druhý kolektor se skloněným. Jedná se především o skloněný kolektor se vzorkem C2, která dosahovala hodnoty 373 nm. Porovnáním nejvyšší a nejnižší hodnoty proumu nanovláken lze dojít k tomu, že vzorek B1 vychází až o několik stovek nanometrů méně než vzorek C2.

Celkové zhodnocení nanovlákených proumů

Parametry elektrostatického zvláknění mají zásadní vliv na proud proumu nanovláken. V této studii byl zkoumán zejména vliv koncentrace roztoku a úhel sklonu a polohy kolektorů. Bylo poukázáno, že s vyšší koncentrací a úhlem sklonu narůstá proud proumu nanovláken. Nejvýraznější změny mezi nejnižší a nejvyšší hodnotou proumu byla zjištěna u použití jednoho kolektoru. Při němž absolutně celkově nejnižší proud

119,8 nm se dosáhl ve vzorku M1 horizontálně naklápěného kolektoru. U soustavy kolektor byl dosažen absolutně nejvyšší průměr nanovláken 373 nm, a to konkrétně u vzorku C2 pravého kolektoru horizontálně nastavených. Vzhledem, že u soustav kolektor byla použita jen jedna koncentrace, a to 12 %, lze teoreticky odhadnout, jaké průměry budou vznikat. Zhodnocením naměřených hodnot i bez použití dalších koncentrací vyplývá, že průměry nanovláken při použití jednoho kolektoru jsou výrazně nižší, než je to u soustav kolektor. Na obr. 17 je dobře vidět rozdíl v průměrech



Obr. 17 Snímky nanovláknenné vrstvy s nejnižšími (a) a (b) nejvyššími průměry

3.3.3. Distribuce nanovláken

Metoda, která byla aplikována pro popis rozložení nanovláken v nanovláknenné vrstvě, vychází ze schématu na obr. 18. Schéma tvoří tři části získané z různých míst nanovláknenné vrstvy. Vyhodnocení takto vytvořeného schématu je založeno na tom, jakou část zaujímají černé tvorečky z celkového počtu tvoreček v procentech. Černý tvoreček ve schématu představuje hmotu nanovláken a bílý tvoreček místo, nezaplněné nanovláknem. Vyhodnocení bylo provedeno u každé části zvlášť a poté celkově. Ze získaných výsledků, lze vyčíslit rozložení nanovláken ve vrstvě.

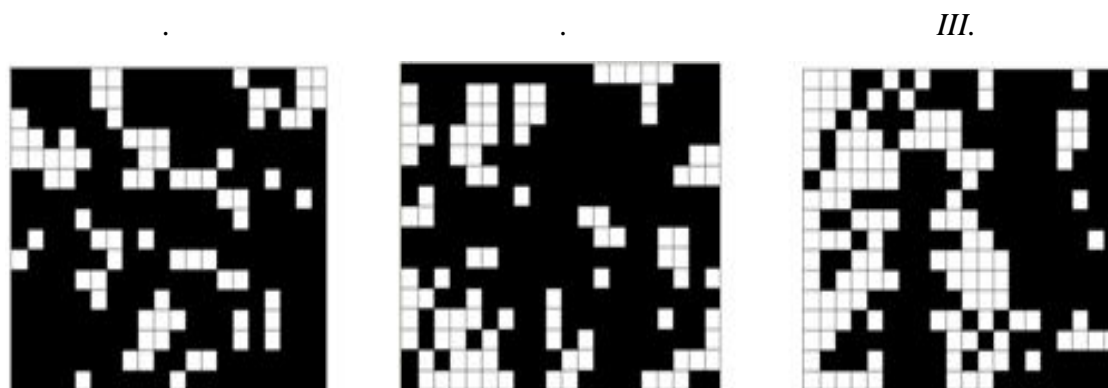
Horizontální nakládný kolektor

Vzorky vytvořené z 12% polymerního roztoku za různých postavení kolektoru byly podrobeny analýze podle této metody. Schémata *I.*, *II.*, *III.* znázorňují postavení kolektoru při 60°, 40° a 20° vzhledem k pomocné ose. Získaná data poukazují na to, že se stoupajícím stupněm sklonu kolektoru klesá procentuální podíl nanovláknenné hmoty a roste plocha nezaplňná nanovláknem.

Tedy schéma . se zdá procentuálně nejvíce zastoupená nanovláknem a nejrovnoměrněji rozložená v ploše. Nasvědčuje tomu podíl nanovláken, kdy pravá polovina je zastoupena o minimum procent více než u levé poloviny plochy schématu . Procentuální podíl pravé poloviny je 54% z celkového podílu 76,6 % nanovláken.

Na schématu . se nanovláknem soustřeďuje spíše do pravé poloviny. Rozložení nanovláken v ploše schématu . spadají ještě do kategorie rovnoměrně rozložených. Podíl nanovláken v pravé polovině schématu činí 61,9 %.

Z naměřených hodnot vyplynulo, že rozložení nanovláken ve schématu *III.* je nerovnoměrné. V porovnání se schématy *I.* a *II.* je nejvíce asymetrické a nerovnoměrné. Pravá polovina zahrnuje 76,25% z celkové plochy nanovláken, která je 61,9 %.



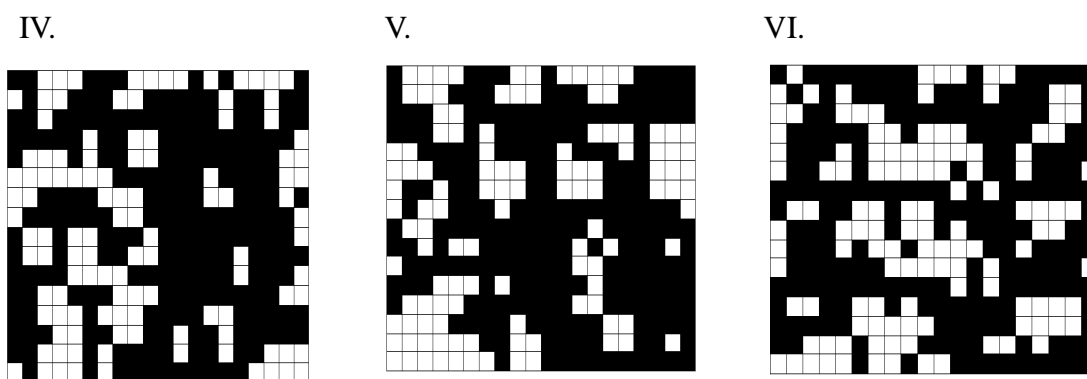
Obr. 18 Schémata *I.*, *II.*, *III.* zobrazují rozložení nanovláken v nanovláknenné vrstvě horizontálního nakládného kolektoru při 60°, 40° a 20°

Vertikáln naklánný kolektor

Jednotlivá schémata znázorují postupné naklánní kolektoru. Schéma V. zastupuje 90° nastavení kolektoru vzhledem pracovní desce. Rozložení nanovláken v ploše schématu V. je orientováno do pravé strany, tedy do druhé poloviny. Tato polovina je tvořena procentuálně v tím podílem nanovláken. Celkový podíl nanovláken v ploše schématu V. činí 64,38 %, z toho pravá část obsahuje přes 71,3 % celkového podílu nanovláken. Z uvedených hodnot vyplývá, že rozmístění nanovláken ve schématu V. je nerovnomrné.

Schéma s označením V. znázoruje 60° sklon kolektoru. Na první pohled se rozmístění nanovláken zdají rovnomrnější, než je to u prvního schématu. Opět jsou nanovláknata spíše orientována na druhou polovinu schématu s rozdílem 16 % oproti první polovině. Druhá polovina schématu V. je zaplněna z 66,25 % z celkového podílu nanovláken, což je 63,75 %. Rozmístění nanovláken lze považovat za nerovnomrné.

Poslední schéma VI. reprezentuje 30° skloní kolektoru. Rozmístění nanovláken je ze všech nastavení kolektoru nejrovnomrnější. Napovídají tomu získané hodnoty podílu nanovláken v ploše schématu VI. Opět z větší části je více zastoupena nanovláknatá druhá polovina schématu, a to z 63% z celkového podílu 60,94%. Schéma VI. spadá hraničně do kategorie rovnomrně rozmístěných nanovláken.



Obr. 19 Schéma IV., V. a VI. zobrazují rozložení nanovláken v nanovlákněné vrstvě vertikálně naklánného kolektoru při 90° , 60° a 30°

Diskuze výsledk distribuce nanovláken za použití jednoho kolektoru

Zhodnocení celkového podílu nanovláken, které zaujímají plochu ve schématech, poukazují na to, že se sklonem kolektoru klesá jejich podíl. Nejvyšší celkový nanovlákný podíl 76,6% byl zahrnut ve schématu . se sklonem 60° horizontálně naklánného kolektoru. Nejnižší celkový nanovlákný podíl tvoří 60,94 % ve schématu VI. vertikálně naklánného kolektoru s úhlem sklonu 30°. Schéma . tvoří nejvyšší podíl nanovláken ze všech nastavení kolektoru, mimo toho jsou nanovlákná nejrovnomerněji rozmístěná. Rozdíl mezi levou a pravou polovinou schématu . je minimální ze všech postavení jednoho kolektoru. Nejmarkantnější rozdíl mezi oběma polovinami je ve schématu III., kdy pravá polovina obsahuje 76,25% nanovláken. Ve srovnání všech schémat za použití jednoho kolektoru vyšlo toto schéma jako nejméně rovnoměrně rozložená nanovlákná.

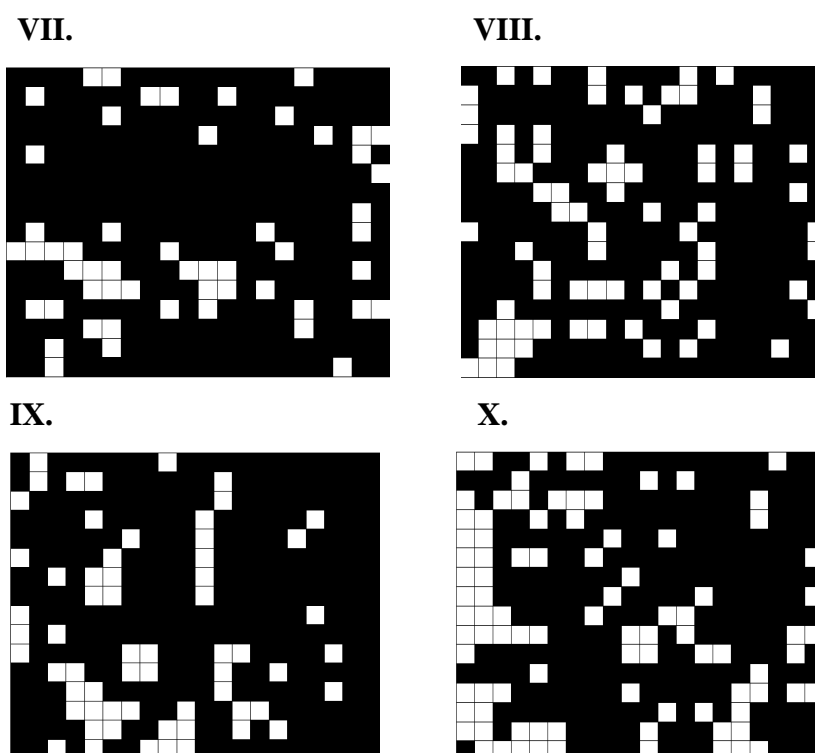
Tab. 10 Procentuální zastoupení nanovláken jednotlivých schémat při použití jednoho kolektoru

Schéma	Podíl nanovláken [%]		
	Levá polovina	Pravá polovina	Celkový
.	47,5	52,5	76,6
.	38,08	61,92	71,6
.	23,75	76,25	61,9
IV.	28,69	71,31	64,38
V.	33,75	66,25	63,75
VI.	36,87	63,13	60,94

Paralelní a šikmo postavení kolektory

Distribuce nanovláken při použití paralelně nastavených kolektorů jsou zobrazeny ve schématech VII. a VIII. Podíl nanovláken druhé poloviny ve schématu VII. zastupující levý kolektor tvoří 57,5 % z celkového podílu 83,13 %. Vyjadřuje minimální rozdíl v podílech nanovláken obou částí. Jde o rovnoměrné rozložení nanovláken. Druhá polovina schématu VIII. pravého kolektoru je tvořena nanovláčky z 60 % celkového podílu 76,25 %. Stejně jako schéma VII. jsou nanovláčka rovnoměrně rozložena.

Deváté a desáté schéma zobrazuje rozložení nanovláken při šikmo postavených kolektorech. Druhá polovina schématu IX. obsahuje 61,26 % nanovláken z celkového podílu 81,25 %. Rozmístění nanovláken můžeme vyhodnotit jako rovnoměrné. Schéma X. můžeme podle naměřených hodnot lze vyhodnotit jako nerovnoměrné rozložení nanovláček, nebo druhá polovina tohoto schématu obsahuje 66,6 % z celkového podílu 70,93 %.

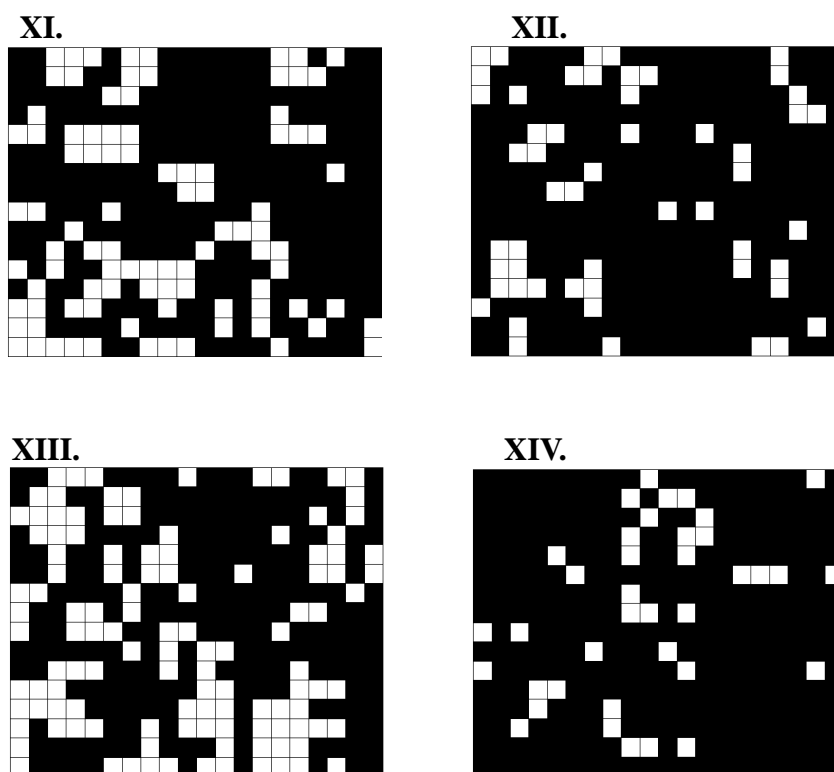


Obr. 20 Schémata zobrazující rozložení nanovláken za a) paralelně (VII., VIII.) a b) šikmo postavených kolektorů (IX., X.)

a) Horizontálně postavený a nakloněný kolektor b) dva kolektory odkloněné do stran

Jedenácté schéma představuje rozložení nanovláken ve vrstvě za použití horizontálně postaveného kolektoru spolu s druhým skloněným kolektorem. Rozložení nanovláken ve vrstvě je podle zjištěných hodnot nerovnoměrné. Přibližně druhá polovina schématu disponuje plochou, kdy je zaplněna až 68,13 % nanovláčky. Rozdíl mezi oběma polovinami téhož schématu je výrazný. Schéma XII. zobrazuje nanovláčkovou vrstvu z nakloněného kolektoru. Poměr nanovláken mezi první a druhou polovinou je 40/60. Takové rozložení nanovláken lze ještě považovat za rovnoměrné.

Tinácté a čtrnácté schéma označují nanovláčkovou vrstvu přibližně dvou kolektorech odkloněných do stran. Podíl nanovláken první a druhé poloviny schématu XIII. je v poměru 40/60, což ještě hovoří o rovnoměrném rozložení. Ve schématu XIV. je rozložení nanovláken velice rovnoměrné, přibližně rozdíl mezi oběma polovinami je jen 3,75 %.



Obr. 21 Schémata zobrazující rozložení nanovláken za a) horizontálně postaveného kolektoru (XI.) spolu nakloněným kolektorem (XII.) a b) dvou kolektory odkloněných do stran (XIII. a XIV.)

Diskuze výsledk rozložení nanovláken za použití jednoho kolektoru

Nejvýraznějších výsledků se dosáhlo ve schématech XI., XIII. a XIV. znázorňující rozložení nanovláken ve vrstvě. Schéma XI. znázorňuje nanovláčkovou vrstvu, kde jsou nanovláčka nerovnoměrně rozložena, a to nejvíce ze všech schémat při použití soustavy kolektorů. Její nerovnoměrnost je dána 68,1 % obsahem nanovláken zastoupených v pravé polovině schématu. Nerovnoměrně rozložená nanovláčka jsou znázorněna ve schématu XIV. a rozdíl mezi oběma polovinami je minimální. V případě schématu XIV. je celkově zastoupena nanovláčka více než 88%.

Tab. II Procentuální zastoupení nanovláken jednotlivých schémat
za soustavy kolektorů

Schéma	Nastavení kolektoru	Podíl nanovláken [%]			
		Kolektor	Levá pol.	Pravá pol.	Celkový
VII.	paralelní	První	47,5	52,5	83,13
VIII.	paralelní	Druhý	40	60	76,25
IX.	šikmo	První	34,4	65,6	70,93
X.	šikmo	Druhý	38,7	61,3	81,25
XI.	horizontální	První	31,9	68,1	70,94
XII.	nakloněná	Druhý	39,4	60,6	83,44
XIII.	odkloněná do stran	První	40	60	63,13
XIV.	odkloněná do stran	Druhý	46	54	88,13

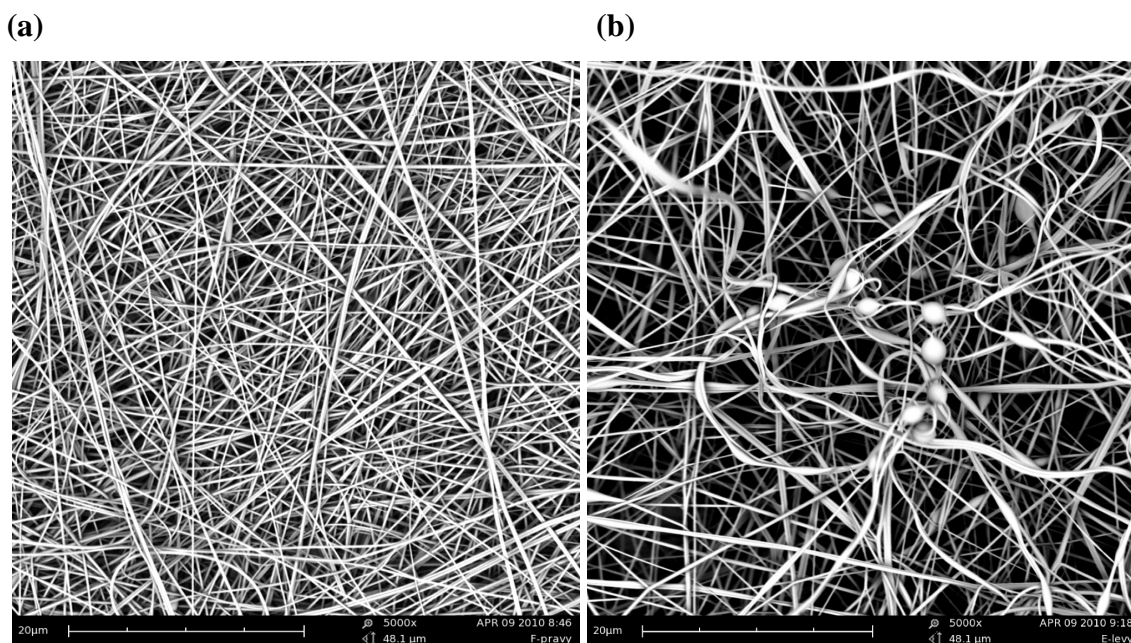
Celkové zhodnocení rozložení nanovláken

Porovnáním získaných hodnot se došlo k závěru, že nejvýraznější vliv na rozložení nanovláken mělo použití soustavy kolektorů. Konkrétně se to týká schématu XIV. při kolektorech odkloněných do stran a schématu VII. paralelně postavených kolektorů. Schéma XIV. znázorňuje plochu, kde je celkově nejvíce

zastoupena nanovlákný ze všech uvedených schémat jednotlivých nastavení kolektoru i kolektor. Absolutně ze všech použitých nastavení kolektoru/ je nejrovnomernější rozložení nanovláken znázorněno ve schématu XIV. Rozdíl mezi jednotlivými částmi schématu je minimální rozdíl 2,5 %.

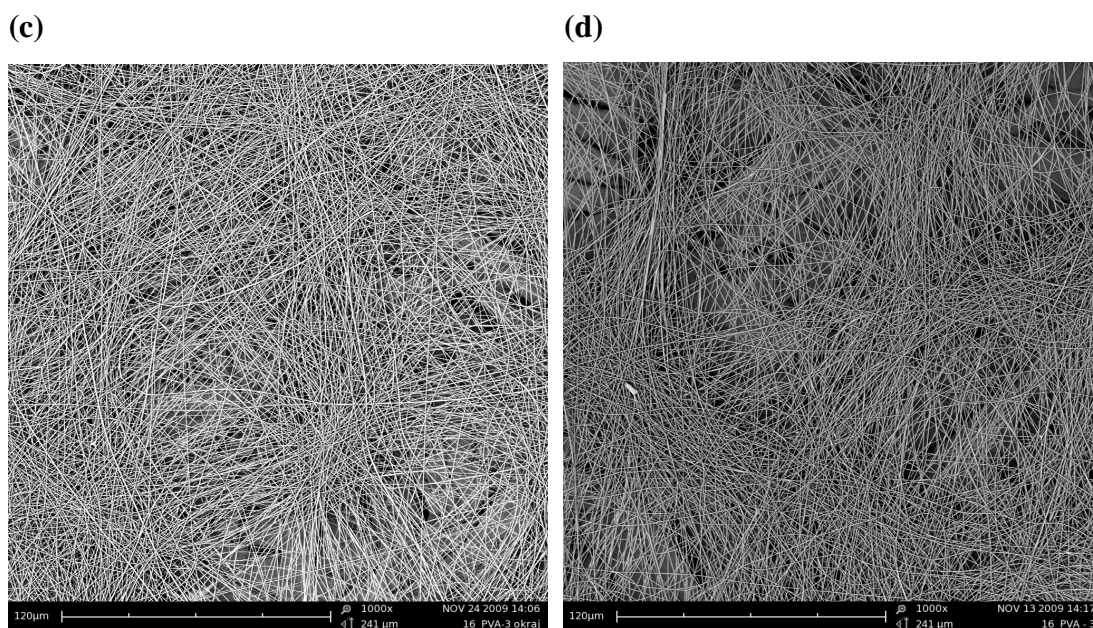
3.4. Zhodnocení snímků nanovláknenných vrstev z makrohlediska

Na obr. 22 (a) je uvedena nanovláknenná vrstva vytvořená z 16 % roztoku PVA s použitím dvou kolektorů nastavených do stran. Konkrétně jde o druhý, tedy pravý kolektor. Snímek (b) je opět získán z 16% roztoku PVA, ale za použití jiného nastavení kolektorů, a to v soustavě horizontálně postaveného a nakloněného kolektoru. Jedná se o nakloněný kolektor z výše uvedené soustavy kolektorů. Obrázek (a) tvoří víceméně izotropní strukturu, kde jsou nanovláknena orientována nahodile. Zatímco nanovláknena na obrázku (b) tvoří také izotropní strukturu s občasnými tzv. korálovými defekty.



Obr. 22 Snímky nanovláknenných vrstev za použití soustavy kolektorů
a) odkloněný do stran b) nakloněný kolektor

Snímky (c) a (d) znázorňují nanovláknenné vrstvy při 1000x násobném zvětšení. Nanovláknenná vrstva byla vytvořena pomocí jednoho kolektoru. Konkrétně snímek (c) při použití vertikálního a (d) horizontálního skláněného kolektoru. Nanovláknenná vrstva zobrazená na snímku (c) tvoří „shluky“ nanovláken. Ve shluku jsou nanovláknena vzájemně rovnoběžná. Mezi „shluky“ jsou místa, kde jsou nanovláknena zastoupena iději, čím je efekt shluků zvýrazněn. Snímek (d) obsahuje větší podíl nanovláken než ve snímku (c). Obr. 23 (d) také obsahuje shluky nanovláken, ale v menším množství než u (c). To vypovídá o rovnoměrnějším rozložení nanovláken ve vrstvě.



Obr. 23 Snímky nanovláknenných vrstev při použití jednoho kolektoru c) horizontálního a d) vertikálního nastaveného kolektoru

4. Závěr

V této bakalářské práci byl zkoumán vliv vybraných procesních a systémových parametrů elektrostatického zvláknění na výslednou strukturu a vlastnosti nanovláknenné vrstvy. Zejména byl kladen důraz na prozkoumání vlivu koncentrace polymerního roztoku polyvinylalkoholu, také především na počet kolektorů a úhel jejich sklonu. Jejich případná aplikace může být vhodná v mnoha oblastech, jako je zdravotnictví, kde vytvořené nanovláknenné vrstvy lze do budoucna využít pro řízené dávkování léků, resp. pro rýst buněk.

Hlavní částí bakalářské práce byla příprava nanovláknenné vrstvy modifikací zařízení. Použité zařízení pro elektrostatické zvláknění bylo modifikováno tak, že uzemněný kolektor, resp. kolektory byly nastaveny v různých úhlech proti zvláknovací elektrodě.

Vytvořené nanovláknenné vrstvy jednotlivých koncentrací a nastavení kolektoru resp. kolektorů byly vyhodnoceny za pomoci světelné optické, elektronové mikroskopie a obrazové analýzy prostřednictvím softwaru NIS ELEMENTS 3.0. Parametry nanovláknenné vrstvy získané obrazovou analýzou zahrnovalo průměry, poróznost a distribuci nanovláken.

Nanovláknenná poróznost byla ovlivněna koncentrací polymerního roztoku. Se zvyšující koncentrací roztoku se nanovláknenná poróznost zvyšovala, a to ve všech nastavení kolektoru. V případě jednoho kolektoru se s každým sklonem kolektoru poróznost zvyšovala. Soustava kolektorů nejrychleji snížila poróznost, a to konkrétně v případě, kdy se kolektory odklonily do stran.

Analýza průměrů nanovláken poukázala na to, že jako u poróznosti se s sklonem a koncentrací roztoku průměry nanovláken měnily. V případě soustavy kolektorů se dosáhlo nejvyšších průměrů, zatímco u jednoho kolektoru horizontálně nastaveného nejnižších průměrů vláken. S rostoucí koncentrací roztoku dosahovaly průměry vláken vyšších hodnot.

Nejvýrazněji se v distribuci nanovláken projevil soustavou kolektorů, a to odkloněných do stran, která nejviditelněji ovlivnila rozložení nanovláken v nanovláknenné vrstvě.

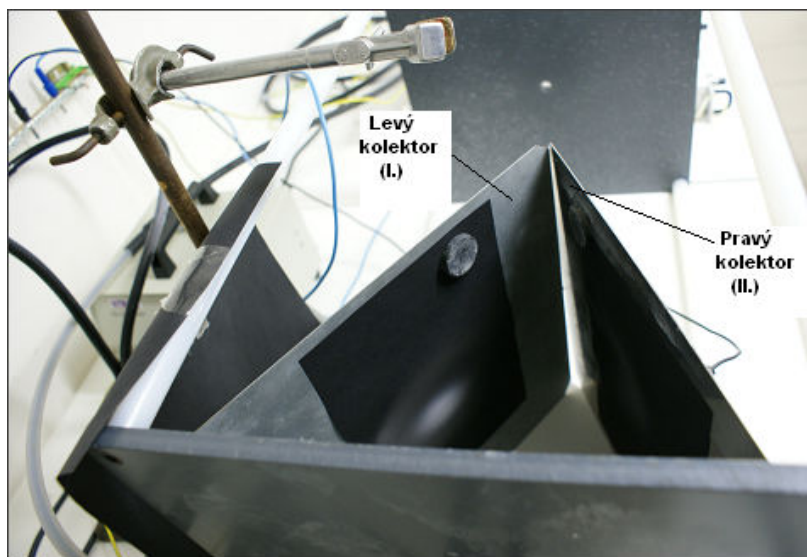
Na dosavadní práci by mohlo být dále navázáno případným zvlákněním jiných koncentrací roztoků polyvinylalkoholu, resp. jiných polymerů a následným testováním.

Literatura:

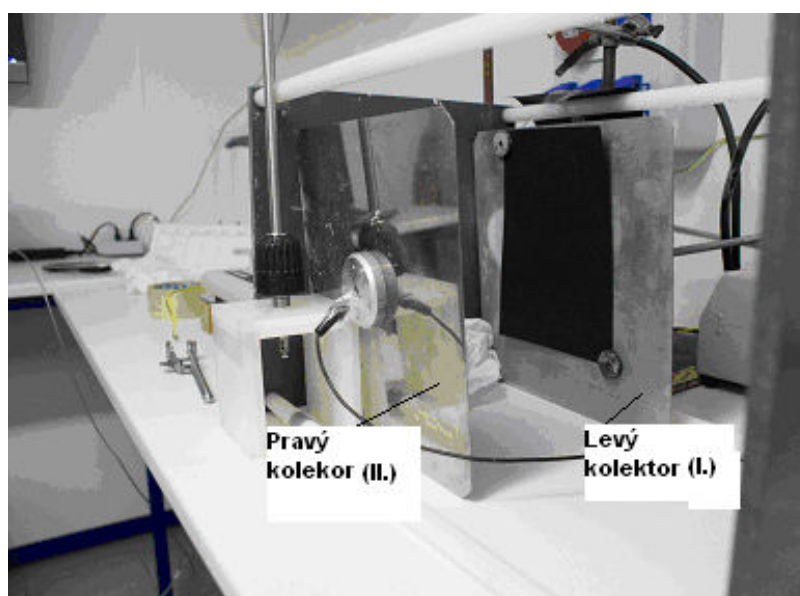
- [1] R ži ková, J.: *Elektrostatické zvlák ování nanovláken*. 1. vydání.Liberec:Technická univerzita,2004.54s.ISBN 80-7083-867-1.
- [2] Lukáš, David.: *Electrostatic spinnig of nanofibres* [online].Vystaveno 15.7.2008 [cit. 2010-03-28].Dostupné z:
https://skripta.ft.tul.cz/database/list_kat.cgi?kat=KNT&skr=194&pro=
- [3] Kalinová K.: *Thermál and chemical technologies of nonwovens*. Vystaveno 15.7.2008 [cit.2010-03-28]. Dostupné z:
https://skripta.ft.tul.cz/database/list_kat.cgi?kat=KNT&skr=119&pro=
- [4] Koski, A.-Yim, K.-Shivkumar, S.: *Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning*, *Materials Letters*, Volume 58, Issues 3-4, January 2004, Pages 493-497.
- [5] Jirsák, O. et al.: *Výroba a vlastnosti nanovláken* [online]. Vystaveno 14.3.2010 [cit. 2010-03-28]. Dostupné z:
https://skripta.ft.tul.cz/database/list_kat.cgi?kat=KNT&skr=103&pro=
- [6] Kr anský, J.: *Perspektivy využití nanotextilií na bázi polymer ve stavebnictví*. eské vysoké u ení technické v Praze, Fakulta stavební. Vystaveno 7.1.2009 [cit. 2010-03-29].
- [7] Sidlof, Hr za.: *Nanovlákené filtry a jejich použití v sana ních technologiích*. Vystaveno 14. 9. 2009 [cit. 2010-03-30].
- [8] Krebsová, M.: *Nauka o polymerech*. 1. vydání.Liberec: Vysoká škola strojní a textilní, 1979.223s. íslo publikace 55-817-79.
- [9] Duchá ek V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [10] Schejbalová, J.- Stibor, I. *Úvod do studia organické a makromolekulární chemie*. 1. vydání.Liberec: Technická univerzita,2004.204s. 80-7083-879-5.
- [11] Hájková, Z.: *Návrh implementace nových poznatk z interdisciplinárního oboru nanotechnologie v eské republice*.(Diplomová práce) Praha: Univerzity Karlovy, 2009.
- [12] Martinová, L. *Pr vodce studiem netkaných*[online]. Vystaveno 3. 3. 2010 2010 [cit. 2010-03-28].Dostupné z
https://skripta.ft.tul.cz/database/list_kat.cgi?kat=KNT&skr=51&pro=
- [13] Necká , B. *Struktura a vlastnosti textilií (p ednáška)* Liberec:TUL, 11.3.2010

Příloha

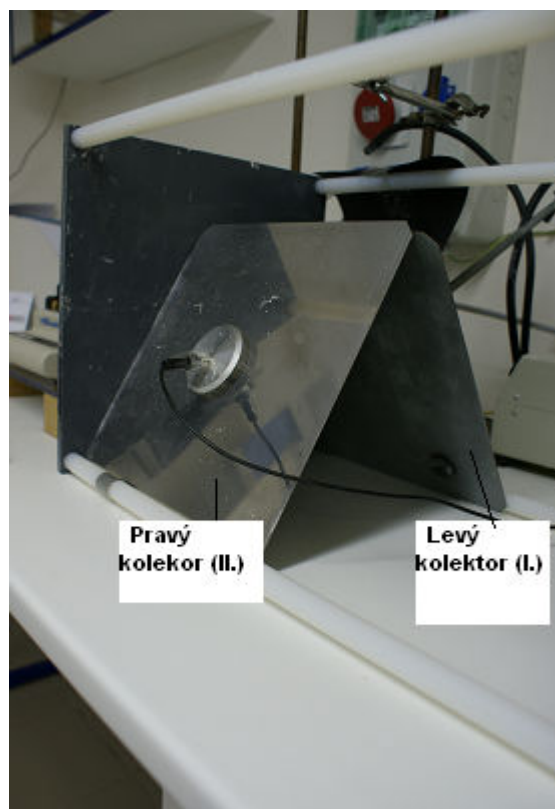
Zařízení pro elektrostatické zvláknění při použití soustav kolektorů



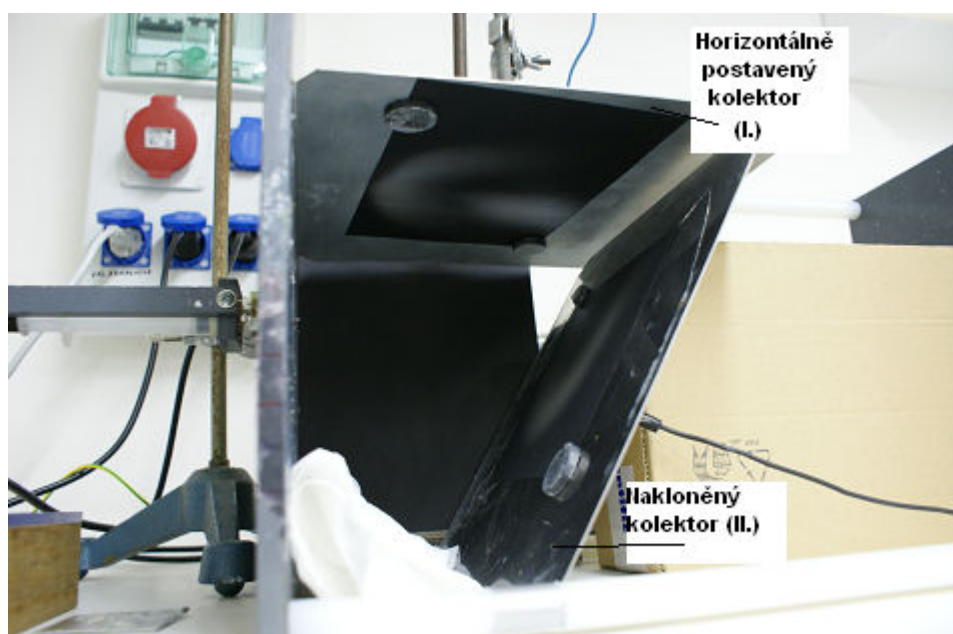
a) Dva kolektory odkloněné do stran



b) Paralelně postavené kolektory

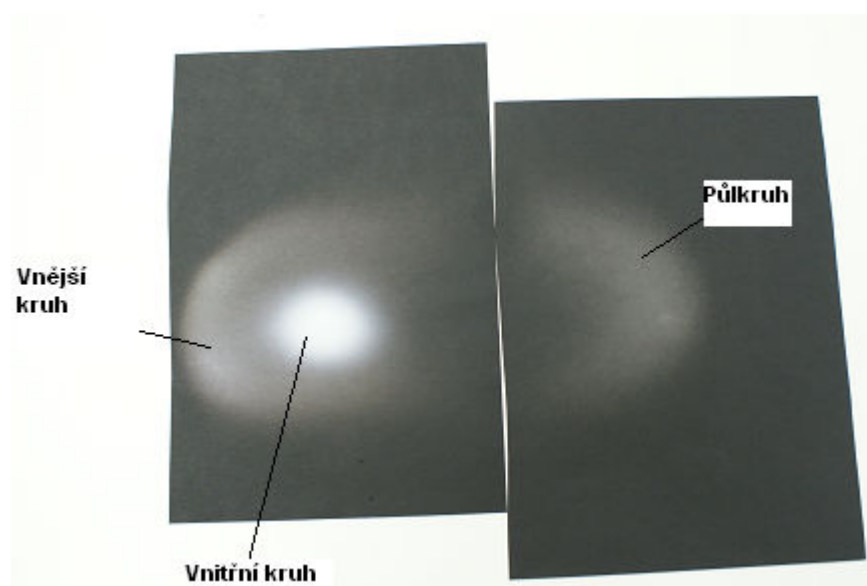


c) Kolektory postavené šikmo

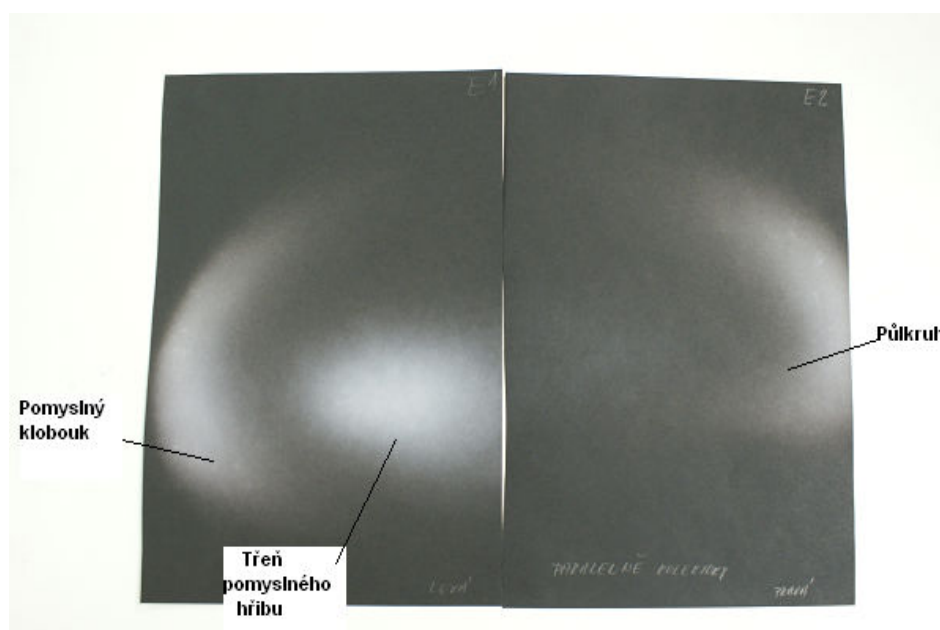


d) Horizontálně postavený a nakloněný kolektor

Vzorky nanovláknenných vrstev



Nanovláknenné vrstvy s použitím dvou kolektorů odkloněných do stran



Nanovláknenné vrstvy s použitím paralelně postavených kolektorů

